

Entwicklung und Einsatz eines Entscheidungsunterstützungssystems in der Verkehrszentrale einer Fluggesellschaft

Vom Fachbereich Rechts- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades Doctor rerum politicarum (Dr. rer. pol.) genehmigte Dissertation von Sebastian Heger

Erstgutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Hans-Christian Pfohl
Zweitgutachterin: Jun.-Prof. Dr. Anne Lange

Darmstadt — 2018



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Rechts- und
Wirtschaftswissenschaften

Supply Chain- und
Netzwerkmanagement

Heger, Sebastian: Entwicklung und Einsatz eines Entscheidungsunterstützungssystems in der Verkehrszentrale einer Fluggesellschaft

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Tag der mündlichen Prüfung: 05.07.2018

Jahr der Veröffentlichung: 2018 (TUprints)

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-76367

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/7636>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung — Nicht-kommerziell — Keine Bearbeitung 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Zusammenfassung

Faktoren wie Globalisierung, Liberalisierung und verbesserte Produktionsfaktoren fungieren in den letzten Jahrzehnten als Treiber für ein kontinuierliches Wachstum im kommerziellen Luftverkehr. Dementsprechend ist auch die Steuerung des operativen Betriebes der einzelnen Fluggesellschaften durch ihre Verkehrszentralen immer komplexer und aufwändiger geworden. Störer Ereignisse und deren Auswirkungen treffen die im starken Wettbewerb stehenden Fluggesellschaften heute härter denn je zuvor, so dass ein dringender Bedarf zur besseren Unterstützung von Entscheidungen innerhalb der Verkehrszentrale zur Reduktion von zusätzlichen Kosten existiert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden methodische Ansätze diskutiert, um die bisher überwiegend theoretisch existierenden und kaum genutzten Entscheidungsunterstützungssysteme zu praxistauglichen Systemen auszubauen. Insbesondere aus technologischer und funktionaler Sicht sind trotz der intensiven Forschung in den letzten 30 Jahren keine großen Veränderungen zu registrieren, da Annahmen über die unternehmerische Praxis regelmäßig zu sehr vereinfacht und zu wenig verallgemeinert werden.

Durch die vorliegende Arbeit werden die Aufgaben, Organisationsgestaltung sowie Informations- und Kommunikationssysteme innerhalb der Verkehrszentrale systematisch dargestellt. Sowohl die Identifikation von Handlungsoptionen sowie den Rahmenbedingungen und dem Zusammenspiel einzelner Akteure sind von zentraler Bedeutung, um zu verstehen, wie Funktionsbereiche und Entscheider ihre täglichen Aufgaben erfüllen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden relevante Anwendungsfälle und Anforderungen abgeleitet.

Gerade die Vielzahl möglicher Modelle und Algorithmen aus dem Bereich der mathematischen Optimierung, welche bereits durch die Forschungsarbeiten thematisiert worden sind, werden erneut durch diese Arbeit bewertet und weiterführend analysiert. Denn nur allgemeingültige und flexible Ansätze können dabei unterschiedlichen Fluggesellschaften mit möglichst geringen Anpassungen adressieren.

Die Ergebnisse dieser Arbeit stützen sich zum großen Teil auf den Erkenntnissen, die im Rahmen eines vierjährigen Forschungsprojektes mit einem aus mehreren verschiedenen Fluggesellschaften bestehenden Konzern erarbeitet wurden. Im Rahmen der Kooperation ist als Ergebnis ein praxistaugliches Entscheidungsunterstützungssystem auf Basis dieser Arbeit entstanden, welches sich bereits parallel in zwei Verkehrszentralen des Forschungspartners im produktiven Betrieb befindet. Damit das Tool für weitere Fluggesellschaften innerhalb des Konzerns einfach ausgerollt werden kann, wurde die Optimierungslogik soweit wie möglich mittels eines Geschäftsregel-Managementsystems entkoppelt.

Abstract

Factors such as globalization, liberalization and improved production factors have been driving continuous growth in commercial air transport in recent decades. Accordingly, the management of operations by the airlines' operations control centers has become increasingly complex and costly. Since today's highly competitive airlines are more severely affected by disruptive events and their effects than ever before, there is an urgent need for better decision support within the operations control centers to reduce additional costs.

Within the scope of this work, methodological approaches are discussed to extend the decision support systems, which up to now are mainly a theoretical construct and have hardly been used, to be established as practical systems. Despite intensive research over the last 30 years, there have been no major changes from a technological and functional point of view. Primarily responsible is that assumptions about business practices are regularly simplified and less generalized.

This paper systematically presents the tasks, organizational design and information and communication systems existing within the operations control centers. The identification of options for action and the framework conditions as well as the interaction of individual actors are necessary to understand how functional areas and decision-makers fulfill their daily tasks. Based on these findings, relevant use cases and requirements are derived.

Especially the variety of possible models and algorithms from the field of mathematical optimization, that have already been addressed by the research work, are reinvestigated and further analyzed. This is a necessary step because only universal and flexible approaches can address different airlines with as few adjustments as possible.

The results of this work are mainly based on the findings of a four-year research project, which was carried out together with a group of several different airlines. As part of this cooperation, a practical decision support system based on this work has been developed, which is already in productive environment in two operations control centers of the research partner. To make it easy for other airlines within the group to roll out the tool, the optimization logic was decoupled as far as possible using a business rule management system.

Danksagung

Zuerst möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Hans-Christian Pfohl für das große Vertrauen in meine Arbeit, insbesondere im Rahmen der Forschungsk Kooperation, herzlich danken. Durch dieses Vertrauen konnte ich mir einen reichhaltigen Erfahrungs- und Wissensschatz in den verschiedenen Themen des Luftverkehrs aufbauen. Meiner Korreferentin Frau Jun.-Prof. Dr. Anne Lange danke ich sehr für das stets umfangreiche Feedback zu den einzelnen Zwischenständen der Forschungsarbeit. Die Gespräche und die Anregungen haben mich stets zu motivieren gewusst. Meinem früheren Bürokollegen Ulrich Berbner bin ich für die Unterstützung dankbar, damit ich mich als Neuling an der TU Darmstadt schnell einleben konnte. Außerdem stand er mir bei der Bearbeitung der anfangs fachfremden Themen stets bei Seite.

Einen großen Dank geht an alle Mitarbeiter des Forschungspartners, deren unermüdliche Unterstützung und zielgerichtete Zusammenarbeit den Grundstein für diese Arbeit gelegt haben. Besonders danke ich dabei Projektleiter Torsten, der stets für einen kontinuierlichen Fortschritt im Projekt sorgte, meine Arbeit immer zu Schätzen wusste und mit größter Unterstützung auch das Unmögliche für mich möglich machte. Meinen größten Respekt zolle ich den Mitarbeitern der Verkehrszentralen. Insbesondere möchte ich Maren und Klaus hervorheben, die für meine umfangreichen Fragen und Ideen stets Rede und Antwort standen. Für die fruchtbare Zusammenarbeit im Bereich der mathematischen Optimierung möchte ich mich auch bei Markus bedanken, dessen Meinung, Fachwissen und Rat ich bereits zu Beginn des Projektes sehr zu schätzen gelernt habe. Des Weiteren danke ich Axel, Günter, Jürgen, Jörg, Robert und Stefan aus der IT für die umfangreiche Unterstützung bei den technischen Fragen und organisatorischen Aufgaben.

Großer Dank gebührt auch meinem Arbeitgeber, der M2P Consulting GbmH, für die Wertschätzung meiner Arbeit und das Einräumen der zusätzlichen Zeit, damit die Ergebnisse dieser Arbeit auch fertig zu Papier gebracht werden konnten. Besonders hervorheben möchte ich das IT-Team bestehend aus Armin Berres, Bernd Noll, Frank Morbitzer und Max Winterstein für ihren Einsatz und Beitrag zur technischen Ausgestaltung der Ergebnisse.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Eltern Renate und Reinhard Heger herzlich bedanken, die mir zur Bewältigung der Arbeit stets den nötigen Rückhalt gegeben haben. Ein ganz besonderer Dank geht an meinen Bruder Alexander Heger, der mich bei der Korrektur mit seiner ganzen Zeit und Motivation unermüdlich unterstützte. Diese Arbeit widme ich meiner Partnerin Marina Rothenbücher und unserem gemeinsamen Sohn Lars, die während der Anfertigung der Arbeit mit mir durch dick und dünn gegangen sind. Leider hatte ich in den letzten Jahren viel zu selten und zu wenig Zeit für gemeinsame Aktivitäten, was jetzt unbedingt nachgeholt werden muss.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Abkürzungsverzeichnis | VII |
| Abbildungsverzeichnis | IX |
| Tabellenverzeichnis | XI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Problemstellung | 2 |
| 1.2 Zielsetzung | 4 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 5 |
| 2 Die Verkehrszentrale: Mittelpunkt des operativen Managements | 7 |
| 2.1 Aufgaben der Verkehrszentrale | 7 |
| 2.1.1 Überwachen des operativen Betriebes | 8 |
| 2.1.2 Reagieren bei Abweichungen und Störereignissen | 15 |
| 2.1.3 Vorbeugende Steuerungskonzepte | 22 |
| 2.1.4 Beziehung zum Flugplanungsprozess | 23 |
| 2.2 Aufbau und Organisation | 25 |
| 2.2.1 Funktionsbereiche und deren Aufgaben | 26 |
| 2.2.2 Gestaltung der Organisationsstruktur | 33 |
| 2.2.3 Entscheidungsprozesse | 38 |
| 2.3 Informations- und Kommunikationssysteme | 39 |
| 2.3.1 Verkehrsleitung | 41 |
| 2.3.2 Flugzeugeinsatz- und Wartungssteuerung | 42 |
| 2.3.3 Dispatch und Beladungsplanung | 42 |
| 2.3.4 Creweinsatzsteuerung | 45 |
| 2.3.5 Stationssteuerung | 45 |
| 2.3.6 Passagierbuchungssteuerung | 47 |
| 2.3.7 Externe Systeme | 47 |
| 2.3.8 Datawarehouse und Analytics | 48 |
| 2.4 Zusammenfassung | 48 |
| 3 Entscheidungsunterstützungssysteme: Stand der Technik | 49 |
| 3.1 Identifikation von Anwendungsfällen | 49 |
| 3.1.1 Störungs- und Abweichungsmanagement | 50 |
| 3.1.2 Optimierung der Flugzeugumläufe | 52 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2 | Entwicklungsstand in Theorie und Praxis | 54 |
| 3.2.1 | Wissenschaftliche Literatur | 55 |
| 3.2.2 | Prototypische und eingesetzte Lösungen | 62 |
| 3.2.3 | Kommerzielle Produkte | 63 |
| 3.3 | Beschreibung von fachlichen Anforderungen | 66 |
| 3.3.1 | Funktionalitäten | 68 |
| 3.3.2 | Technologieauswahl | 74 |
| 3.3.3 | Nutzerfreundlichkeit | 77 |
| 3.3.4 | Zusammenarbeit | 80 |
| 3.4 | Wirtschaftlichkeit | 82 |
| 3.5 | Zusammenfassung | 84 |
| 4 | Modelle und Algorithmen: Methodisches Fundament | 85 |
| 4.1 | Lineare ganzzahlige Optimierung (IP) | 86 |
| 4.1.1 | Modellierung durch IPs | 87 |
| 4.1.2 | Lösen von IPs | 93 |
| 4.1.3 | Softwareunterstützung | 102 |
| 4.1.4 | OR-Modellklassen und Komplexität | 103 |
| 4.2 | Bewertung der Modelle aus der Literatur | 107 |
| 4.2.1 | Heuristische Modelle ohne ganzzahlige Optimierung | 108 |
| 4.2.2 | Time-Space Netzwerke | 110 |
| 4.2.3 | Time-Band Netzwerke | 112 |
| 4.2.4 | Modelle auf Basis von Mengenüberdeckung oder Mengenzerlegung | 112 |
| 4.2.5 | Anschlussbasierte Modelle | 115 |
| 4.3 | Zusammenfassung | 116 |
| 5 | JARVIS - Just A Rather Very Intelligent Solver | 117 |
| 5.1 | Ausgangssituation und Vorgehensweise | 118 |
| 5.1.1 | Auswahl von Anwendungsfällen | 118 |
| 5.1.2 | Implementierungsvorgehen | 119 |
| 5.2 | Systemdesign und -modell | 120 |
| 5.2.1 | Integration in das bestehende Verkehrsleitsystem | 122 |
| 5.2.2 | Optimierung und Geschäftsregelmanagementsysteme | 126 |
| 5.2.3 | Mathematisches Modell | 127 |
| 5.2.4 | Entwicklungsplan | 136 |
| 5.3 | Auswertung und Ergebnisse | 138 |
| 5.3.1 | Crew-Flugzeug-Umlaufsynchronisierung | 139 |
| 5.3.2 | AOG | 142 |
| 5.3.3 | Kapazitätsreduzierungen | 144 |
| 5.3.4 | Kaskadierende Effekte minimieren | 145 |

| | |
|---|------------|
| 5.3.5 Vergleichbarkeit mit Ergebnissen in der Literatur | 146 |
| 5.4 Einführung in den Betrieb | 147 |
| 5.5 Zusammenfassung | 148 |
| 6 Ausblick | 149 |
| Literaturverzeichnis | 150 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------------|---|
| AA | IATA-Code für American Airlines |
| ACARS | Aircraft Communications Addressing and Reporting System |
| AGIFORS | Airline Group of the International Federation of Operational Research Societies |
| AOG | Aircraft on Ground |
| AOC | Air Operator Certificate |
| APU | Auxiliary Power Unit |
| ARINC | Aeronautical Radio Inc. |
| ATAG | Air Transport Action Group |
| ATC | Air Traffic Control |
| BVD | Bodenverkehrsdienste |
| CDM | Collaborative Decision Making |
| DFS | Deutsche Flugsicherung GmbH |
| DWD | Deutscher Wetterdienst |
| EG | Europäische Gemeinschaft |
| EU | Europäische Union |
| ETOPS | Extended Operations |
| FAA | Federal Aviation Administration |
| GDP | Ground Delay Programm |
| GPU | Ground Power Unit |
| GRMS | Geschäftsregel-Managementsystem |
| IATA | International Air Transport Association |
| ICAO | International Civil Aviation Organization |
| INFORMS | Institute for Operations Research and Management Science |
| IP | Integer Programming |

| | |
|---------------|---|
| IRP | Integrated-Recovery-Problem |
| KLM | IATA-Code für KLM Royal Dutch Airlines |
| LH | IATA-Code für Lufthansa Passage |
| LP | Linear Programming |
| MEL | Minimum Equipment List |
| MILP | Mixed Integer Linear Programming |
| MIP | Mixed Integer Programming |
| MMEL | Master Minimum Equipment List |
| NEXTOR | National Center of Excellence for Aviation Operations Research |
| OCC | Operations Control Center |
| OR | Operations Research |
| RINS | Relaxtion Induced Neighborhood Search |
| ROADEF | Société française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision |
| SaaS | Software-as-a-Service |
| SITA | Société International de Télécommunications Aéronautiques |
| SLA | Service-Level-Agreement |
| STD | Scheduled Time of Departure |
| STA | Scheduled Time of Arrival |
| USA | United States of America |
| VZ | Verkehrszentrale |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|-----|
| 1.1 | Auswertung der Verspätungen für inneramerikanische Flüge der größten US-Airlines von 2007 bis 2016 auf Datengrundlage des Bureau of Transportation Statistics | 3 |
| 2.1 | Schematische Darstellung des Gesamtsystems Luftverkehrs | 8 |
| 2.2 | Exemplarische Prozessübersicht für den Turnaround einer Boeing 737 | 12 |
| 2.3 | Folgeverspätungen einer einzelnen Flugverspätung in Baumdarstellung | 14 |
| 2.4 | Schematische Darstellung des Entscheidungsprozesses in der Verkehrszentrale . . | 15 |
| 2.5 | Exemplarischer Planungsprozess von Fluggesellschaften | 24 |
| 2.6 | Übersicht der möglichen Funktionsbereiche in der Verkehrszentrale | 26 |
| 2.7 | Verkehrszentrale der niederländischen KLM | 34 |
| 2.8 | Verkehrszentrale von American Airlines (AA) | 34 |
| 2.9 | Separierte Verkehrszentralen in einer Gruppe von Fluggesellschaften | 37 |
| 2.10 | Partiell integrierte Verkehrszentrale in der Gruppe von Fluggesellschaften | 38 |
| 2.11 | IT-Systemübersicht in der Verkehrszentrale | 40 |
| 2.12 | Multiple Gantt-Charts in <i>NetLine/Ops</i> ++ | 41 |
| 2.13 | Übersicht der Transferpassagiere in <i>NetLine/Ops</i> ++ | 42 |
| 2.14 | Graphische Darstellung der Flugwegplanung mit <i>Lido/Flight 4D</i> | 43 |
| 2.15 | WINDS Modul in <i>Lido/Flight 4D</i> zur Flugverfolgung | 44 |
| 2.16 | Visualisierung der Flugzeugbeladung durch <i>NetLine/Load</i> | 44 |
| 2.17 | Verschiedene Masken in <i>NetLine/Crew</i> | 46 |
| 2.18 | Mehrere Turnaround-Prozesse in <i>NetLine/Hub Turnaround Manager</i> dargestellt . . | 46 |
| 2.19 | Übersicht von Passagierumsteigeströmen in <i>NetLine/Connex Manager</i> | 47 |
| 3.1 | Entwicklung der Anzahl von Forschungsbeiträgen zur Entscheidungsunterstützung in der Verkehrszentrale im Zeitraum 1984 bis 2017 | 61 |
| 3.2 | <i>NetLine/Ops</i> ++ <i>Solver xOPT</i> | 64 |
| 3.3 | <i>Sabre® AirCentre™ Recovery Manager</i> | 65 |
| 3.4 | <i>Amadeus Schedule Recovery</i> | 66 |
| 3.5 | Verwendung des Leavitt-Diamanten zur Darstellung verschiedener Erfolgsfaktoren im Kontext von Entscheidungsunterstützungssystemen | 67 |
| 4.1 | Phasenmodell für das Vorgehen in der OR-Forschung | 85 |
| 4.2 | Graphische Darstellung des Simplex-Verfahren (links) gegenüber Innere-Punkte-Verfahren (rechts) | 101 |
| 4.3 | Time-Space-Netzwerk des exemplarischen Flugplans | 110 |
| 4.4 | Exemplarischer Flugplan als Mengenüberdeckungsproblem | 113 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 4.5 | Darstellung des exemplarischen Flugplans als anschlussbasiertes Netzwerk | 115 |
| 5.1 | Gesamtarchitektur von JARVIS | 121 |
| 5.2 | Neu integrierte JARVIS Oberfläche (orange umrandet) in bereits bestehendes Verkehrsleitsystem | 123 |
| 5.3 | Die zwei Tabs des JARVIS Widgets zur Interaktion von Anwender und System . . . | 123 |
| 5.4 | Profilauswahl und Eingabe von Kapazitätsreduzierungen im JARVIS Widget | 124 |
| 5.5 | Statusreport und KPIs für eine generierte Lösung in JARVIS | 125 |
| 5.6 | Konzept der separaten Anschlussvariablen für Flugzeug und Crew | 133 |
| 5.7 | Anzeige der Creweinsatzpläne im bestehenden Verkehrsleitsystem | 140 |
| 5.8 | Darstellung eines AOG in der Gantt-Chart | 143 |
| 5.9 | Lösung für ein Flugzeug mit AOG dargestellt in der Gantt-Chart | 143 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Beispiele von Streiks im Luftverkehr in Deutschland von 2012 bis 2016 | 10 |
| 2.2 | Beispiele von weltweiten Streiks im Luftverkehr in 1998 und 1999 | 11 |
| 2.3 | Ausschnitt aus beispielhaftem Wartungsplan für ein Langstreckenflugzeug | 20 |
| 3.1 | Forschungsbeiträge für Entscheidungsunterstützung in der VZ älter als 1999 . . . | 58 |
| 3.2 | Forschungsbeiträge für Entscheidungsunterstützung in der VZ zwischen 1999 und 2009 | 59 |
| 3.3 | Forschungsbeiträge für Entscheidungsunterstützung in der VZ seit 2010 | 60 |
| 3.4 | Übersicht der Prototypen oder eingesetzten Entscheidungsunterstützungssysteme in der VZ auf Basis der analysierten Literatur. | 62 |
| 4.1 | Minimalistischer Beispielflugplan mit drei eingesetzten Flugzeugen | 108 |
| 4.2 | Forschungsbeiträge mit rein heuristischen Methoden oder ohne ganzzahlige Optimierung bis zum Jahr 2001 | 108 |
| 4.3 | Forschungsbeiträge mit rein heuristischen Methoden oder ohne ganzzahlige Optimierung von 2002 bis 2016 | 109 |
| 4.4 | Forschungsbeiträge mit rein heuristischen Methoden oder ohne ganzzahlige Optimierung in 2017 | 110 |
| 4.5 | Übersicht der Forschungsbeiträge zwischen 2004 und 2017 auf Basis von Mengenüberdeckungs- oder Mengenzerlegungsproblemen | 114 |
| 5.1 | Ausgewählte Flotten und Flüge für die Crew-Flugzeug-Umlaufsynchronisierung . . | 140 |
| 5.2 | Auswertung des Einsatzes von JARVIS für das Synchronisieren von Flugzeug und Crew für Tag 1 | 141 |
| 5.3 | Auswertung des Einsatzes von JARVIS für das Synchronisieren von Flugzeug und Crew für Tag 2 | 141 |
| 5.4 | Auswertung der Laufzeit und Qualität von JARVIS in Reduzierungsszenarien . . . | 144 |
| 5.5 | Auswertung der Lösungsqualität von JARVIS zum Auflösen von verschiedenen Ver- spätungsszenarien | 146 |
| 5.6 | Ergebnisse von verschiedenen Szenarien einer einstündigen Schließung des Hubs für eine Teilflotte in JARVIS mit maximal 60 Minuten Verspätung pro Flug. | 147 |

1 Einleitung

Wurden im Jahr 2014 noch 3,3 Milliarden Passagiere weltweit befördert, waren es in 2015 bereits 3,57 Milliarden Passagiere.¹ Globalisierung, Bevölkerungsentwicklung, Liberalisierung und verbesserte Produktionsfaktoren fungierten dabei in den letzten Jahrzehnten als Treiber für ein kontinuierliches Wachstum im kommerziellen Luftverkehr.² Die Marktstudien der beiden konkurrierenden Flugzeughersteller Airbus und Boeing prognostizieren zudem übereinstimmend, dass der Luftverkehr in den nächsten 20 Jahren jährlich weiterhin um durchschnittlich etwa 4,4% bzw. 4,7% wachsen wird.³

Vergleicht man die beiden Studien der Air Transport Action Group (ATAG) aus 2014 und 2016 genauer, so verteilt sich der Zuwachs von 33 Millionen Passagieren, 733 Flugzeugen und 1,8 Millionen Flügen im Zeitraum von 2012 bis 2014 auf eine stabil gebliebene Anzahl von etwa 1400 Fluggesellschaften.⁴ Gerade für die größeren Fluggesellschaften ist es zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor geworden, die immer größer werdende Komplexität im Griff zu behalten.⁵ Insbesondere bei betrieblichen Unregelmäßigkeiten sowie kurzfristig auftretenden Störsituationen muss eine Verkehrszentrale (VZ) als steuernder Mittelpunkt des operativen Betriebs diese Komplexität beherrschen, um den Flugplan sowie den Flugzeug- und Creweinsatzplan konsistent zu halten und die Reiseverbindungen von Passagieren sicherzustellen.

Schon 1961 wurde daher mit der Gründung der Airline Group of the International Federation of Operational Research Societies (AGIFORS)⁶ auf Initiative von verschiedenen Fluggesellschaften der Grundstein dafür gelegt, die Vorteile von Operations Research (OR) für ihr Geschäft nutzbar zu machen.⁷ Derzeit arbeiten fünf verschiedene Arbeitsgruppen, bestehend aus Fluggesellschaften, IT-Providern und Universitäten, innerhalb der AGIFORS gemeinsam an relevanten Themen. So können heute im Bereich der strategischen Planungsaufgaben sowie beim Erlösmanagement die in der OR-Forschung entwickelten Methoden erfolgreich eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu sind bei den Aufgaben der operativen Steuerung bisher noch keine nachweislich signifikanten Verbesserungen erzielt worden.⁸ Etwa 75% der relevanten Forschungsbeiträge beschäftigten sich nach CASTRO/ROCHA/OLIVEIRA schwerpunktmäßig mit der Entwicklung von Modellen und Algorithmen, ohne dabei deren Anwendung in der Praxis umfangreich zu untersuchen.⁹ Nach KARISH ET AL. sind die heute existierenden Entscheidungsunterstützungssysteme in der Verkehrszentrale trotz der intensiven Forschung in ihrer Funktionalität und Anwendbarkeit vergleichbar

¹ Vgl. AIR TRANSPORT ACTION GROUP (2016), S. 5.

² Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 38.

³ Vgl. AIRBUS (2017), S. 22; BOEING (2017), S. 19.

⁴ Vgl. AIR TRANSPORT ACTION GROUP (2016), S. 5f.; AIR TRANSPORT ACTION GROUP (2014), S. 5f.

⁵ Vgl. VON GÖTZ (2005), S. 147.

⁶ <http://www.agifors.org>.

⁷ Vgl. RICHTER (1989), S. 3.

⁸ Vgl. KARISCH et al. (2012), S. 289; BARNHART/BELOBABA/ODONI (2003), S. 369.

⁹ Vgl. CASTRO/ROCHA/OLIVEIRA (2014), S. 37.

zu den Erlösmanagementsystemen von 1980 oder den Crewplanungssystemen von 1990 und damit weit weg von einem aktuellen, industrieweiten Standard.¹⁰ Somit ergibt sich ein hoch spannendes Forschungsfeld, bei dem noch nicht alle Themen und Aspekte vollständig adressiert sind.

Zur systematischen Bearbeitung eines Forschungsfeldes ist es daher im Rahmen der Einleitung zuerst notwendig, sich mit der konkreten Problemstellung intensiver auseinanderzusetzen und gegenwärtige Forschungslücken zu identifizieren, bevor die entsprechende Zielsetzung in Form von Forschungsfragen entwickelt sowie der Aufbau der weiteren Arbeit erläutert wird.

1.1 Problemstellung

Gerade das Verhalten der Fluggesellschaft JetBlue während und nach dem großen Schnee- und Eissturm am Valentinstag 2007 in den USA zeigt zweifelsohne, dass ein effektives Management des operativen Betriebes mancherorts keine Selbstverständlichkeit zu sein scheint. JetBlue musste auf Grund ihres operativen Missmanagements in der gesamten Folgewoche eines einzelnen Sturmtages noch weitere 25% ihres Flugprogrammes streichen, da die Verkehrszentrale wegen mangelhaften Steuerungs-, Informations- und Kommunikationssystemen sowie nicht ausreichend qualifizierten Personals mit der gesamten Situation überfordert war. Als Konsequenz der hohen Entschädigungszahlungen und der öffentlichen Kritik wurden ein Großteil der Führungskräfte des operativen Managements samt des Firmengründers ausgewechselt.¹¹

Neben den vielen Unannehmlichkeiten für Passagiere entstehen auch signifikante Kosten und Aufwendungen, welche Fluggesellschaften täglich auf Grund von Störungen zusätzlich verausgaben. Nach einer Studie des National Center of Excellence for Aviation Operations Research (NEXTOR) der Federal Aviation Administration (FAA) verursachten Flugverspätungen im Jahre 2007 auf inneramerikanischen Flügen zusätzliche Kosten in Höhe von insgesamt 8.3 Milliarden US-Dollar für die ansässigen Fluggesellschaften.¹² Eine Vergleichsstudie des Joint Economic Committee des US-amerikanischen Kongresses kommt sogar zu dem Ergebnis, dass es sich im selben Zeitraum um 19 Milliarden US-Dollar zusätzlicher Aufwendungen handelte.¹³ Beide Studien beziffern zudem auch die finanziellen Folgeschäden für Passagiere zwischen 12 und 16 Milliarden US-Dollar. Nicht mit eingerechnet ist dabei die Belastung und der Schaden für die Umwelt, welche durch zusätzlichen Lärm und Emissionen in Folge von Störungen verursacht werden.¹⁴ Unabhängig voneinander wurden beide Auswertungen auf Datengrundlage der Airline On-Time Statistics and Delay Causes¹⁵ des Bureau of Transportation Statistics erstellt. Betrachtet man diese Daten weiterführend für die Jahre 2007 bis 2016 in Abbildung 1.1, so hat sich der Teil der Verspätungen, für welche die Fluggesellschaften zum großen Teil selbst verantwortlich sind,

¹⁰ Vgl. KARISCH et al. (2012), S. 291.

¹¹ Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 152f.; RAPAJIC (2009), S. 9.

¹² Vgl. BALL et al. (2010), S. VII.

¹³ Vgl. SCHUMER/MALONEY (2008), S. 1.

¹⁴ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 18.

¹⁵ Online verfügbar unter www.transtats.bts.gov/OT_Delay/OT_DelayCause1.asp (Stand: 02.02.2018).

kaum verändert. Somit dürften die damals ermittelten Zahlen der Studien anhand der vergangenen Wachstums- und Inflationsraten heute immer noch als untere Grenze valide sein.

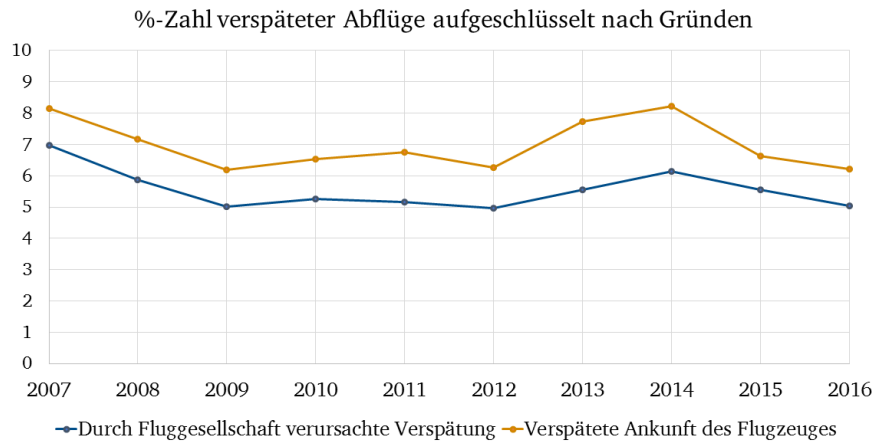


Abbildung 1.1: Auswertung der Verspätungen für inneramerikanische Flüge der größten US-Airlines von 2007 bis 2016 auf Datengrundlage des Bureau of Transportation Statistics

Obwohl offensichtlich ein großer Bedarf für Entscheidungsunterstützung existiert, können für die Absenz solcher Systeme bei den Fluggesellschaften zwei Hauptgründe identifiziert werden.

Zum einen sind seit 1984 im Bereich der Entscheidungsunterstützungssysteme in der Verkehrszentrale bereits über 80 Forschungsbeiträge erschienen, jedoch sind bei den Methoden die Annahmen über die unternehmerische Praxis seitens der Forschung meist sehr vereinfacht und zu wenig verallgemeinert. Es wird sich dabei kaum mit dem Umfeld und den Rahmenbedingungen auseinandergesetzt, in dem die entwickelten Methoden eingesetzt werden sollen. Beispielsweise werden oft die Entscheidungsprozesse seitens der Mitarbeiter in der VZ nicht adäquat berücksichtigt.¹⁶ Viele dieser simplifizierten Ansätze sind bis heute immer noch weit verbreitet, obwohl schon sehr früh von Seiten der Praxis darauf hingewiesen wurde, dass die wissenschaftlich-theoretischen Arbeiten sich näher an der praktischen Anwendung orientieren sollten.¹⁷ Gerade in der Anfangszeit wurden die Forschungsbeiträge sogar regelmäßig in Zusammenarbeit mit Fluggesellschaften angefertigt, dennoch arbeiten nur eine überschaubare Anzahl der weltweit etwa 1400 Fluggesellschaften mit den daraus entwickelten Entscheidungsunterstützungssystemen.¹⁸ Auch bereits kommerziell verfügbare Produkte, welche ebenfalls zum Teil auf Basis der bestehenden Arbeiten entwickelt wurden, konnten dem dringenden Bedarf für die Entwicklung besserer Systeme bisher nicht gerecht werden.¹⁹

¹⁶ Vgl. BRUCE (2011), S. 10.

¹⁷ Vgl. ANDERSSON (1989), S. 11f.

¹⁸ Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 152; CLARKE (1998b), S. 75.

¹⁹ Vgl. BUCHANAN (2018), S. 124; CLAUSEN et al. (2010), S. 820; RAPAJIC (2009), S. 19.

Zum anderen sind Strukturen innerhalb der Verkehrszentrale auf Grund von früher existierenden Limitationen in der Informations- und Kommunikationstechnologie wie Silos gewachsen. Fluggesellschaften halten oft auch an den individuellen, bestehenden Prozessen, Systemen und Strukturen fest, so dass insbesondere der für Entscheidungsunterstützungssysteme notwendige Umbau der Informations- und Kommunikationssysteme die Fluggesellschaften oft vor große Herausforderungen stellt.²⁰ Diese geringe Wandlungsfähigkeit zeigt sich auch dadurch, dass sich bei vielen Fluggesellschaften die grundlegende Aufbauorganisation der VZ in den letzten 15 Jahren nur minimal verändert hat.²¹ Solche Aspekte müssen deshalb bei der Entwicklung stärker berücksichtigt werden.

Um die identifizierten Forschungslücken zu schließen, muss die OR-Forschung zum einen bei der Entwicklung von Modellen und Algorithmen die bereits bestehenden Annahmen und Vereinfachungen kritischer reflektieren und sich zum anderen mehr mit der Systematisierung der Fragestellung beschäftigen, wie eine breitere Akzeptanz für solche Tools in der unternehmerischen Praxis geschaffen werden kann, ohne dabei zu große Veränderungen an den jeweils individuell bestehenden Strukturen der einzelnen Verkehrszentralen vornehmen zu müssen.

1.2 Zielsetzung

Damit solche Systeme zukünftig den Einzug in die Praxis finden können, ergibt sich für die vorliegende Arbeit das folgende, übergeordnete Forschungsziel:

Übergeordnetes Forschungsziel. *Ziel der vorliegenden Arbeit ist die vollständige Aufarbeitung der aktuellen Prozesse, Systeme und Strukturen innerhalb der Verkehrszentrale zur systematischen Identifikation und Ableitung von Anwendungsfällen und Anforderungen, um damit adäquate Entscheidungsunterstützungssysteme für den praktischen, industrieweiten Einsatz zur signifikanten Senkung der Gesamtkosten für Störungen und Abweichungen im operativen Betrieb bei Fluggesellschaften weiterzuentwickeln.*

Aus diesem Ziel leitet sich auch direkt die entsprechende, übergeordnete Forschungsfrage ab.

Übergeordnete Forschungsfrage. *Wie müssen Entscheidungsunterstützungssysteme unter besonderer Berücksichtigung der aktuellen Organisation und Anforderungen seitens Fluggesellschaften für einen industrieweiten Einsatz weiterentwickelt werden?*

Um die übergeordnete Forschungsfrage umfassend beantworten zu können, wird diese in mehrere, aufeinander aufbauende Teilfragen gegliedert. In einem ersten Schritt muss daher genau analysiert werden, in welchem Umfeld solche Systeme implementiert werden sollen.

Forschungsfrage 1. *Was sind die konkreten Aufgaben einer Verkehrszentrale, wie ist Organisation gestaltet und welche Informations- und Kommunikationssysteme werden aktuell eingesetzt?*

²⁰ Vgl. KARISCH et al. (2012), S. 295; BOYER (2009), S. 4–12.

²¹ Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 147–149; ABDI/SHARMA (2007), S. 120–123; GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 320–330.

Gerade die Identifikation von Handlungsoptionen, Rahmenbedingungen und das Zusammenspiel einzelner Akteure sind von zentraler Bedeutung, um zu verstehen, wie Funktionsbereiche und Entscheider ihre täglichen Aufgaben erfüllen. Anschließend stellt sich folglich die Frage, bei welchen Entscheidungen solche Systeme zur Unterstützung eingesetzt werden können, was sie leisten müssen und wie sich der aktuelle Stand bestehender Systeme in Forschung und Praxis darstellt.

Forschungsfrage 2. *Welche Anwendungsfälle für Entscheidungsunterstützungssysteme gibt es, wie weit ist der aktuelle Entwicklungsstand und welche funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen müssen berücksichtigt werden?*

Zur Bearbeitung einer konkreten Problemstellung gibt es gerade im Bereich OR und Wirtschaftsinformatik eine Vielzahl möglicher Ansätze und Methoden, welche bereits durch die Forschungsarbeiten thematisiert worden sind. An dieser Stelle muss genauer hinterfragt werden, welche Vorgehensweisen allgemeingültig genug sind, um die identifizierten Anforderungen und Anwendungsfälle umsetzen zu können.

Forschungsfrage 3. *Welche Modelle und Algorithmen im Bereich OR und Wirtschaftsinformatik werden den Anforderungen gerecht und sind als Basis für den heutigen Einsatz als Entscheidungsunterstützung in der Verkehrszentrale geeignet?*

Schlussendlich stellt sich aus den bisher thematisierten Aspekten die Frage, wie ein solches System auf Basis der gewonnen Erkenntnisse konkret gestaltet werden kann.

Forschungsfrage 4. *Wie muss ein Entscheidungsunterstützungssystem für den industrieweiten Praxiseinsatz gestaltet und wie kann bei der Entwicklung vorgegangen werden?*

Gerade für die Implementierung eines solchen Systems bedarf es allgemeingültiger und generalisierter Konzepte, um dabei die unterschiedlichen Typen von Fluggesellschaften mit möglichst geringen Anpassungen adressieren zu können.

Zur systematischen Beantwortung der aufgestellten Fragen bedarf es einer der Fragen adäquaten Vorgehensweise, welche im nächsten Abschnitt genauer dargestellt wird.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit verwendet zur Erreichung des Forschungsziels im Kern den Ansatz der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik.²² Dabei wird aber ein größerer Schwerpunkt auf den erkenntnistheoretischen Teil gelegt, der bisher in vielen Arbeit zur Entscheidungsunterstützung in der Verkehrszentrale nur oberflächlich behandelt wurde. Auf Grund der beschriebenen Forschungslücke teilt sich das übergeordnete Forschungsziel daher gleichwertig in ein Erkenntnisziel sowie ein Gestaltungsziel auf.

²² Vgl. RIEGE/SAAT/BUCHER (2009), S. 69.

Erkenntnisziel. *Systematische Darstellungen der Strukturen, Prozesse, Systeme innerhalb der Verkehrszentrale sowie daraus resultierende Anforderungen und Anwendungsfälle der Fluggesellschaften an Entscheidungsunterstützungssysteme.*

Die Kapitel 2, 3 und 4 widmen sich mit der Beantwortung der ersten drei Forschungsfragen daher dem Erkenntnisgewinn, um so ein umfangreiches Verständnis der gegebenen Sachverhalte zu erzeugen. Dazu wurden zum einen Literatur im allgemeinen Bereich der Verkehrszentrale und Entscheidungsunterstützung in der Verkehrszentrale zusammengetragen und entsprechend strukturiert. Zudem fanden im Rahmen eines vierjährigen Forschungsprojektes mit einem aus mehreren Fluggesellschaften bestehenden Konzern (Netzwerkfluggesellschaften, Regionalfluggesellschaften sowie Low-Cost und Ferienflieger) ganztägige Hospitationen verschiedener Verkehrszentralen und kleinere Workshops mit den entsprechenden Mitarbeitern statt, deren Ergebnisse in diese Arbeit eingeflossen sind. Auch ergaben sich im Rahmen verschiedener Konferenzen die Möglichkeit, vorläufige Erkenntnisse mit anderen Fluggesellschaften und relevanten IT-Providern zu diskutieren, um so zielgerichtet tragbare Systeme in Form des Gestaltungszieles für die allgemeine Praxis zu entwickeln.

Gestaltungsziel. *Weiterentwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems, um es perspektivisch als industrieweite Lösung einsetzen zu können.*

Zur Erfüllung des Gestaltungsziels ist eine adäquate Konstruktion und Validierung von einem oder mehreren Artefakten für die Problemlösung erforderlich, welches ein weiterer zentraler Schritt dieser Arbeit ist. Dabei muss die Validierung nicht nur sicherstellen, dass das Problem gelöst wird, sondern auch, dass die Ergebnisse mit den abgeleiteten Erkenntnissen übereinstimmen. Auf Basis der identifizierten Anwendungsfälle und Anforderungen wird als „Symbiose“ aktueller Forschung im Bereich OR und Wirtschaftsinformatik in Kapitel 5 ein Entscheidungsunterstützungssystem mit dem Arbeitstitel JARVIS als eine Software-as-a-Service (SaaS)-Komponente entwickelt. Die Konstruktion des Systems und des mathematischen Modells sowie die Evaluation auf Basis mehrerer hundert unterschiedlicher Ausgangssituation wird dabei ausführlich dargestellt, um somit auch die vierte Forschungsfrage zu beantworten. Mit Abschluss dieser Arbeit befindet sich das entwickelte System mit einer Teilfunktionalität bereits parallel in zwei Verkehrszentralen des Forschungspartners im produktiven Betrieb.

Somit geht die Implementierung deutlich über die üblicherweise rein prototypische Anwendung in den vielen Forschungsarbeiten hinaus. Dabei wurde ein besonderer Fokus daraufgelegt, dass mittels eines Geschäftsregel-Managementsystems die Optimierungslogik soweit entkoppelt wurde, so dass JARVIS für die verschiedenen Fluggesellschaften innerhalb des Konzerns zukünftig ausgerollt werden kann. Dadurch wird gleichzeitig die notwendige Generalisierbarkeit der Ergebnisse sichergestellt.

2 Die Verkehrszentrale: Mittelpunkt des operativen Managements

Es vergeht kaum ein Tag, an dem eine Fluggesellschaft ihren umfangreich optimierten Flugplan eins zu eins wie geplant umsetzen kann.²³ Tagtäglich gibt es facettenreiche interne und externe Faktoren, welche auf den operativen Betrieb negativ einwirken. Gerade Störungen sind bei technisch geprägten Systemen systemimmanent und äußere Faktoren wie das Wetter wirken limitierend.²⁴ Deshalb haben Fluggesellschaften die innerbetriebliche Funktion der Verkehrszentrale etabliert und mit der Aufgabe des operativen Managements²⁵ betraut. Die meisten Funktionen innerhalb der Verkehrszentrale sind dabei 24 Stunden an 7 Tagen in der Woche im Einsatz.²⁶ Einige Funktionen werden hingegen nur im Bedarfsfall einberufen oder sind lediglich während der regulären Bürozeiten im Unternehmen verfügbar, um weniger dringliche Aufgaben zu bearbeiten.

Damit ein umfangreiches Verständnis dieser verschiedenen Funktionen gewonnen werden kann, adressieren die folgenden Abschnitte die drei Aspekte der ersten Forschungsfrage zu den konkreten Aufgaben, der internen Organisation sowie den Einsatz von Informations- und Kommunikationssystemen.

2.1 Aufgaben der Verkehrszentrale

Die VZ stellt im Prinzip zur Durchführung eines regulären Fluges²⁷ stets sicher, dass ein Flugzeug, mehrere Piloten und Flugbegleiter²⁸ als Hauptressourcen zur Verfügung stehen.²⁹ Deshalb gibt es insgesamt einen Gesamtplan und zwei Ressourceneinsatzpläne, die im operativen Betrieb eine zentrale Rolle spielen.³⁰

- (Gesamt-)Flugplan
- Flugzeugeinsatzplan
- Creweinsatzplan

²³ Vgl. BRUCE (2018), S. 323.

²⁴ Vgl. STEGNER (2014), S. 2.

²⁵ Im englischsprachigen Raum wird die Aufgabe der Verkehrszentrale auch als „Disruption Management“, „Irregular Operations Management“ oder auch „Recovery Management“ bezeichnet.

²⁶ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 133.

²⁷ Der Begriff Flug wird in der Regel synonym für einen Einsegment-Flug benutzt. Dabei kann ein Flug auch aus mehreren Segmenten mit entsprechenden Zwischenlandungen bestehen. In einem solchen Fall wird dann explizit von einem Multisegment-Flug gesprochen.

²⁸ Die Piloten werden in der Regel als Cockpitcrew bezeichnet, die Flugbegleiter als Kabinencrew und alle zusammen als Crew oder fliegerisches Personal.

²⁹ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 149; GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 325.

³⁰ Vgl. BALL et al. (2007), S. 1.

Da die Hauptaufgabe einer Fluggesellschaft in der Durchführung des Transports von Fluggästen und Fracht besteht, müssen auch deren Reise- und Transportwege anhand der Buchungen überwacht und bei Bedarf Umbuchungen vorgenommen werden. Die Aufgabe der Steuerung dieser Pseudoressourcen nennt sich auch Passagierbuchungs- bzw. Frachtsteuerung. Natürlich bedürfen auch weitere Ressourcen wie Bodenpersonal, Gates, Catering etc. einer Steuerung. Diese spielen aber im Vergleich zu den Hauptressourcen, Fluggästen sowie Fracht eine untergeordnete Rolle, da diese weniger kostenintensiv und flexibler sind.³¹

Dabei unterteilt sich die Steuerung des operativen Betriebes in verschiedene Teilaufgaben. Zu einem muss die VZ die eingangs beschriebenen Einflüsse beobachten, bei Bedarf rechtzeitig handeln und gegebenenfalls auch vorbeugende Maßnahmen ergreifen.

2.1.1 Überwachen des operativen Betriebes

Im Allgemeinen kann ein System von unvorhersehbaren Ereignissen, neue Restriktionen, Unsicherheiten in der Systemperformanz, neuen Aspekten, Änderungen in der Systemumwelt oder von Systemparametern sowie in der Verfügbarkeit von Ressourcen beeinflusst werden.³² Gerade das System des Luftverkehrs, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, muss insbesondere auf Grund seiner komplexen Abhängigkeit besonders überwacht werden.

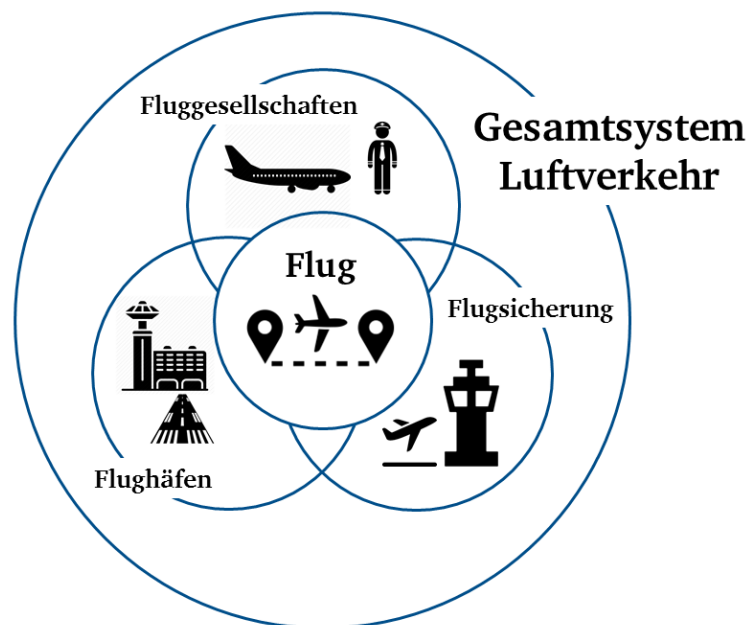


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Gesamtsystems Luftverkehrs [Quelle: KARISCH et al. (2012), S. 286, Übersetzung durch den Verfasser]

³¹ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 150.

³² Vgl. YU/QI (2004), S. 16.

Das beispielsweise bei einigen Inlands-Fluggesellschaften in den USA etwa 10% der regulär operierenden Flüge von Abweichungen und Störereignissen betroffen sind, zeigt, dass Fluggesellschaften als ausführende Instanz von Flügen besonders betroffen sind.³³ Im Folgenden soll eine umfassende Übersicht gegeben werden, welche Faktoren und Gründe Auslöser für Störungen sein und welche negativen Folgen diese mit sich bringen können.

2.1.1.1 Technische Defekte am Flugzeug

Eine branchenweite Statistik hat ergeben, dass etwa 60% der Wartungstätigkeiten an einem Flugzeug ungeplant sind.³⁴ Hauptanlass dafür ist, dass ein Flugzeug seine Flugtauglichkeit etwa durch einen aufgetretenen Defekt (z.B. eine Tür lässt sich nicht mehr vorschriftsmäßig schließen) oder einen Unfall (z.B. Blitz- oder Vogelschlag) verloren hat und daher solange nicht mehr im Betrieb eingesetzt werden darf, bis wieder alle notwendigen Funktionen hergestellt sind.³⁵ Dieser Zustand wird auch als ein sogenanntes „Aircraft on Ground“ (AOG) bezeichnet. Welche technischen Funktionalitäten für den Einsatz dabei genau intakt sein müssen, wird durch die sogenannte Minimum Equipment List (MEL) des Flugzeuges als Teil der Betriebsgenehmigung festgelegt.³⁶ Diese ist für einen Flugzeugbetreiber von der entsprechenden Luftfahrtbehörde auf Grundlage der vom Flugzeughersteller bereitgestellten Master Minimum Equipment List (MMEL) individuell festgelegt.³⁷

Die Behebung eines AOGs kann dabei von ein paar Minuten bis hin zu einigen Tagen dauern. Zudem vergeht meist nach dem Auftreten eine gewisse Zeit, bis die Ursache gefunden ist und feststeht, wie lange die Behebung andauern wird. Diese Zeiten sind oft schwierig exakt vorherzusagen.³⁸ Eine Möglichkeit der Betriebssteuerung unter dieser vagen Informationslage besteht darin, erstmal nur eine Teillösung zu implementieren und dann weiter auf neuere Erkenntnisse zu warten.

2.1.1.2 Planungsunsicherheit der Crews

Fliegerisches Personal kann wie jeder andere Arbeitnehmer auch unpünktlich zum Dienst erscheinen oder sich kurzfristig arbeitsunfähig melden. Außerdem können durch bereits entstandene Verspätungen oder einer ungeplanten Zwischenlandung die Einhaltung der Dienst- und Ruhezeiten gefährdet sein.³⁹ Gerade wenn das Personal mehrere Flüge an einem Tag absolviert, können Verzögerungen beim Umsteigevorgang entstehen, falls beispielsweise von einem zum anderen Flugzeug gewechselt und dabei auf den Transferbus gewartet werden muss.

³³ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 133.

³⁴ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 52.

³⁵ Vgl. BRUCE (2018), S. 330.

³⁶ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 33; WIESKE-HARTZ (2000), S. 21.

³⁷ Vgl. LAUBER (2000), S. 30.

³⁸ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 53.

³⁹ Vgl. BRUCE (2018), S. 330,335.

2.1.1.3 Streik des Personals

Regelmäßig führen Konflikte mit den verschiedenen Personalgruppen im Umfeld des Luftverkehrs zu Arbeitskämpfen. Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht über verschiedene Streiks im Zeitraum 2012 bis 2016 in Deutschland.

| Personalgruppe | Ort/Unternehmen | Jahr |
|--------------------------------|--------------------------------|------|
| Fluggastkontrollen | Hamburg, Düsseldorf, Frankfurt | 2012 |
| Flughafen-Vorfeldaufsicht | Frankfurt | 2012 |
| Flughafen-Bodenverkehrsdienste | Frankfurt | 2012 |
| Flugbegleiter | Lufthansa | 2012 |
| Fluggastkontrollen | Stuttgart, Köln | 2013 |
| Piloten | Augsburg Airways | 2013 |
| Fluggastkontrollen | Hamburg, Düsseldorf | 2014 |
| Piloten | Lufthansa | 2014 |
| Fluggastkontrollen | Hamburg, Düsseldorf | 2015 |
| Flugbegleiter | Lufthansa | 2015 |
| Piloten | Lufthansa | 2015 |

Tabelle 2.1: Beispiele von Streiks im Luftverkehr in Deutschland von 2012 bis 2016 [Quelle: Zusammengestellt aus WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT BEIM BUNDESMINISTER FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (2016), S. 114f.]

Dabei wird in Deutschland im internationalen Vergleich relativ wenig gestreikt. Dass das Problem der Streiks nicht neu ist, zeigt Tabelle 2.2 anhand einiger Beispiele von Arbeitsniederlegungen bei Fluggesellschaften in den Jahren 1998 und 1999. Aber auch die Streiks bei Gesellschaften in anderen Systemteilen haben negative Auswirkungen auf den Betrieb einer Fluggesellschaft, wie etwa die Arbeitsniederlegung der Fluglotsen aus Spanien und Frankreich in 2009 bzw. in 2016 zeigt.⁴⁰ Im Zeitraum zwischen 2010 und 2015 gab es beispielsweise insgesamt 95 Ausstände der Fluglotsen aus 10 verschiedenen europäischen Ländern.⁴¹

In der Regel werden solche Arbeitskämpfe mit einer bestimmten Vorlaufzeit angekündigt, so dass meist mehrere Stunden Zeit bleiben, um einen Notfallplan zu erarbeiten. In einigen Ländern wird diese Vorankündigungszeit sogar durch nationales Recht geregelt.⁴²

⁴⁰ Vgl. VOLTES-DORTA/RODRÍGUEZ-DÉNIZ/SUAU-SANCHEZ (2017), S. 449f.

⁴¹ Vgl. PRICEWATERHOUSECOOPERS (2016), S. 3.

⁴² Vgl. STEGMÜLLER (2015), S. 725f.

| Land | Fluggesellschaft | Personalgruppe | Datum |
|-------------|---------------------|----------------------------|--------------|
| Algerien | Air Algerie | Piloten & anderes Personal | Okt. 98 |
| Dänemark | SAS | Flugbegleiter | Jul. 99 |
| Hongkong | Cathay Pacific | Piloten | Mai/Jun. 99 |
| Italien | Maridiana | Piloten | Jul. 99 |
| Japan | All Nippon | Piloten & Flugbegleiter | Apr. 98 |
| | Japan Air | Piloten | Jun. 99 |
| Mexiko | Aero-Mexico | Flugbegleiter | Jun. 98 |
| Norwegen | Wideroe | Piloten | Jul. 98 |
| Philippinen | Philippine Airlines | Piloten & Personal | Jun. 98 |
| Spanien | Iberia | Piloten | Apr. 98 |
| USA | Alaska Airlines | Ticketagenten & Mechaniker | Apr. 99 |
| | American Airlines | Piloten | Feb. 99 |
| | Northwest Airlines | Piloten | Aug./Sep. 98 |
| Zypern | Cyprus Airways | Piloten | Jun. 99 |

Tabelle 2.2: Beispiele von weltweiten Streiks im Luftverkehr in 1998 und 1999 [Quelle: KLEINER/PILARSKI (2000), S. 625, Übersetzung durch den Verfasser]

2.1.1.4 Überlastung der Infrastruktur am Flughafen

Insbesondere nach einem Flug kann eine Überlastung der Infrastruktur an den Flughäfen dazu führen, dass sich Flugzeuge auf dem Vorfeld stauen, da nicht ausreichend Parkpositionen und Gates zur Verfügung stehen. Es besteht dann schnell die Gefahr, dass sich die Flugzeuge auf den Rollwegen gegenseitig blockieren.

Auch eine Einschränkung der Benutzbarkeit der Landebahn auf Grund von Wartung oder durch Blockierung eines defekten Flugzeuges schränkt den Flugbetrieb in der Regel erheblich ein. Falls auf der Startbahn die Flugzeuge nicht in ausreichender Frequenz starten können, da die Anzahl der Flugbewegungen den zulässigen Maximalwert des Systems übersteigt, bilden sich dort Schlangen, durch die es zu weiteren Verzögerungen kommt.

2.1.1.5 Wetterphänomene am Flughafen

Zu den häufigsten Wetterphänomenen an den Flughafen gehören Wind, Stürme, Nebel, Gewitter und Schnee. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) unterscheidet im aktuell herausgegebenen Wetterschlüssel für die Luftfahrt alleine 21 verschiedene Formen des Niederschlages, der Trübung und anderer Phänomene.⁴³ Tendenziell lässt sich das Eintreten solcher Situation gut vorhersagen, manchmal sind aber Dauer und Intensität nur schwer prognostizierbar.⁴⁴ Wetter ist mit eine

⁴³ Vgl. DEUTSCHER WETTERDIENST (2018), S. 8.

⁴⁴ Vgl. BRUCE (2018), S. 327–329.

der Hauptursachen für Flugverspätungen an Hubs von großen amerikanischen Fluggesellschaften.⁴⁵

So muss im Falle von schlechten Wetter bei eingeschränkter Sicht z.B. der Abstand zwischen An- und Abflügen erhöht werden, was zu einer Reduzierung der Rate von Starts und Landungen am Flughafen führt. Dies bedeutet oft sogenannte „Holdings“, also Warteschleifen für Flugzeuge im Anflug. Ebenfalls kann die Änderung der Windrichtung einen Wechsel der Betriebsrichtung der Start- und Landebahnen notwendig machen, so dass dies ebenfalls zu einer temporären Reduzierung der entsprechenden Raten führt.⁴⁶

Da das Personal auf dem Vorfeld durch Blitze oder starke Böen verletzt oder technisches Gerät unter Wind, Schnee und Eis nur eingeschränkt eingesetzt werden kann, muss die Flugzeugabfertigung in solchen Fällen auf Grund der Sicherheit temporär eingestellt werden oder kann nur mit Verzögerungen durchgeführt werden.⁴⁷ Im Extremfall muss der betroffene Flughafen unter Umständen komplett geschlossen werden.

2.1.1.6 Verzögerung bei der Abfertigung

Der sogenannte Turnaround zur Abfertigung des Flugzeuges zwischen zwei Flügen besteht in der Regel aus verschiedenen abhängigen Teilprozessen, welche in Abbildung 2.2 in zeitlicher Abfolge mit der Dauer in Minuten dargestellt sind.

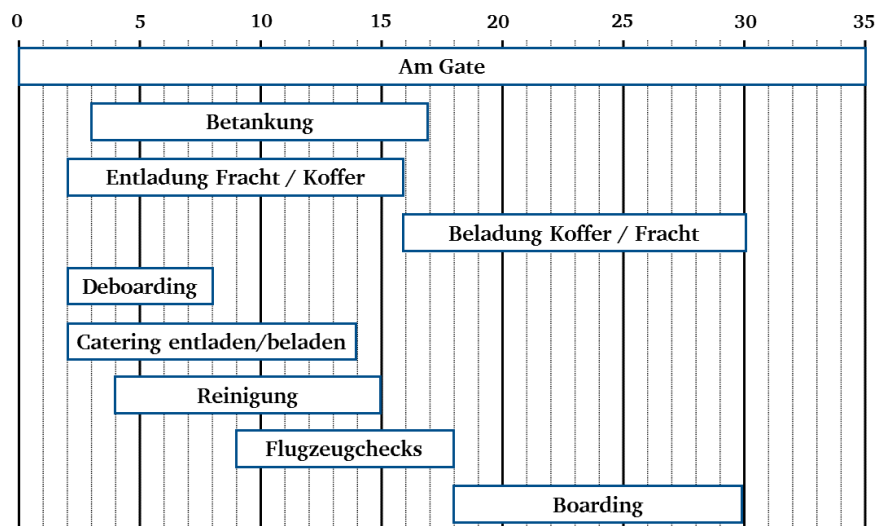


Abbildung 2.2: Exemplarische Prozessübersicht für den Turnaround einer Boeing 737 [Quelle: Wu (2010), S. 24, Übersetzung durch den Verfasser]

⁴⁵ Vgl. CLARKE (1998b), S. 70.

⁴⁶ Vgl. GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 334f.

⁴⁷ Vgl. FRANZI (2018), S. 190f.

Dabei stehen insbesondere die folgenden Teilprozesse Betankung, Catering und Reinigung unter besonderer Beobachtung.⁴⁸ Eventuell muss auf Grund von unvorhersehbaren Ereignissen nachgetankt werden oder es sind umfangreichere Reinigungsarbeiten notwendig als ursprünglich vorgesehen. Auch können Koffer nicht rechtzeitig auf dem Vorfeld ankommen oder müssen auf Grund von Sicherheitsrichtlinien wieder ausgeladen werden.⁴⁹ All diese unvorhersehbaren Unwägbarkeiten können zu potentiellen Verspätungen führen.⁵⁰

2.1.1.7 Systemausfall bei der Flugverkehrskontrolle

Zu häufigen Störungen gehören Probleme an den Flugverkehrskontrollsystemen, wie etwa der Ausfall von Radarsystemen.⁵¹ Solche Vorfälle führen meist zu Störungen von beachtlichem Ausmaß. Gerade die Dienstleister, wie es die Flugverkehrskontrolle ist, stellen in Summe die größte Störungsquelle für Fluggesellschaften dar.⁵²

2.1.1.8 Der unsichere Faktor Passagier

Das Verhalten von Passagieren liegt oft außerhalb der Kontrolle von Fluggesellschaften. Oft müssen Flüge verspätet werden, da Passagiere unpünktlich sind und es schwierig festzustellen ist, wo sich diese befinden (bereits in der Sicherheitskontrolle, gerade am Flughafen oder noch im Stau auf der Zufahrt) und ob sie noch die Chance haben, den Flug zu erreichen.

Insbesondere der Teilprozess des Einsteigens der Passagiere in ein Flugzeug (Boarding) im Rahmen der Abfertigung stellt eine große Unsicherheit dar, da dessen tatsächliche Dauer maßgeblich von der tatsächlichen Anzahl der Passagiere abhängt, die erst relativ konkret kurz vor Abflug feststeht.⁵³

2.1.1.9 Auswirkungen kaskadierender Effekte

Es ist nicht unüblich, dass eine Störung meist eine Serie von weiteren Problemen mit sich bringt.⁵⁴ 2009 wurden in Europa und den USA beispielsweise für jede primäre Verspätungsminute in den Netzwerken der Fluggesellschaften durchschnittlich etwa eine weitere, zusätzliche sekundäre Verspätungsminute generiert.⁵⁵ Dabei sind sekundäre Verspätungsminuten als solche zu verstehen, die Fluggesellschaften selbst als Ursache einer vorangegangenen Verspätung produzieren. Diese Aussage deckt sich dabei mit der in Abbildung 1.1 dargestellten Ergebnisse der eigenen Recherche.

⁴⁸ Vgl. BRUCE (2018), S. 329–333.

⁴⁹ Vgl. MOVIG (2018), S. 202f.

⁵⁰ Vgl. WU (2005), S. 275.

⁵¹ Vgl. CLARKE (1998b), S. 70.

⁵² Vgl. RAPAJIC (2009), S. 7.

⁵³ Vgl. WU (2010), S. 10f.

⁵⁴ Vgl. BRUCE (2018), S. 326; ABDI/SHARMA (2008), S. 138.

⁵⁵ Vgl. COOK/TANNER (2011), S. 4; KONDO (2011), S. L4-7.

Denn die Implementierung einer Lösung für ein spezifisches Problem zieht in der Regel diverse, noch nicht absehbare Auswirkungen nach sich, die auf Grund kaskadierender Effekte später wieder „eingefangen“ werden müssen.⁵⁶ Abbildung 2.3 zeigt anhand eines simplen Beispiels, wie eine ursprüngliche, einzelne Verspätung von 180 Minuten insgesamt 430 Minuten an Folgeverspätungen mit sich ziehen kann.

Insbesondere bei Fluggesellschaften mit vielen Umsteigepassagieren müsste noch eine weitere Dimension in die Baumdarstellung aufgenommen werden, da zusätzliche Folgeverspätungen durch das Warten auf Anschlussreisende verursacht werden können. In solchen Fällen besteht die Gefahr, dass sich das Ignorieren oder auf die Bank schieben kleinerer Probleme dann noch schneller in einer größeren Störung manifestiert.

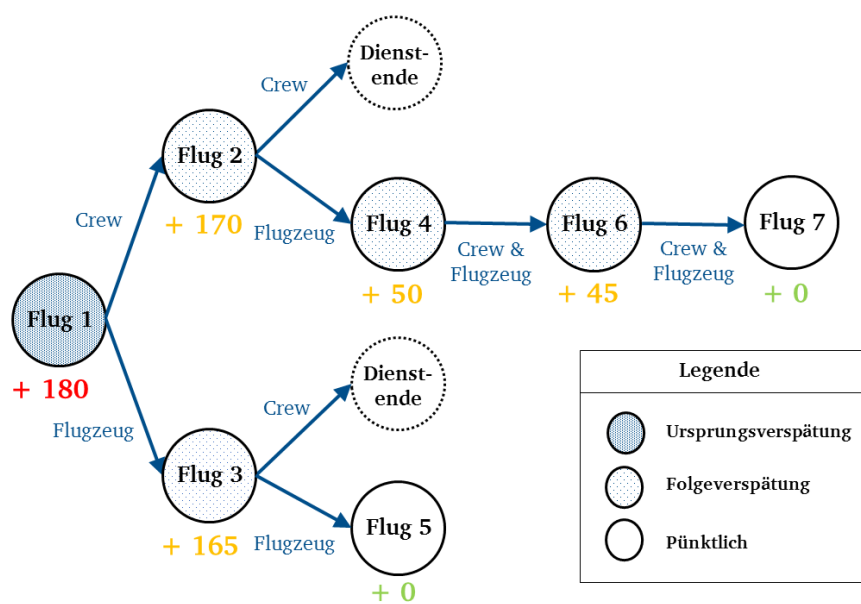


Abbildung 2.3: Folgeverspätungen einer einzelnen Flugverspätung in Baumdarstellung [Quelle: Geringfügig angepasst aus AHMADBEYGI et al. (2008), S. 223]

2.1.1.10 Abweichungen bei der Flugdurchführung

Nicht immer kann ein Flugzeug nach dem Start auf seinem regulären Flugweg zum Ziel fliegen. Gewitter oder Sperrungen im Luftraum können eine Umleitung erzwingen, so dass mit einer verspäteten Ankunft am Zielflughafen zu rechnen ist. Während des Fluges können aber auch technische Probleme auftreten, so dass die sichere Durchführung gefährdet oder nicht mehr garantiert werden kann. In diesem Fall muss der Pilot mit dem Flugzeug auf einen passenden Flughafen in der Nähe ausweichen. Aber auch ein medizinischer Notfall eines Passagiers an Bord kann eine Ausweichladung zwingend nötig machen.⁵⁷

⁵⁶ Vgl. GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 332.

⁵⁷ Vgl. ABDI/SHARMA (2008), S. 140.

2.1.1.11 Ereignisse von höherer Gewalt

Neben den bisher genannten, häufiger auftretenden Ereignissen können auch eher außergewöhnliche und unvorhersehbare Vorkommnisse Einfluss auf den Betrieb nehmen. Als Beispiel sei der mehrtägige Vulkanausbruch des Eyjafjallajökull auf Island im Jahr 2010 zu nennen, der zur Einstellung des Flugbetriebes in weiten Teilen Europas führte.⁵⁸

Darüber hinaus können auch allgemeine Vorfälle wie Epidemien, Naturkatastrophen, Terror oder politische Unruhen außerhalb des Systems Luftverkehr sowohl kurz- als auch langfristige Auswirkung mit sich ziehen.

2.1.2 Reagieren bei Abweichungen und Störereignissen

Prinzipiell gibt es keine allgemeingültige Definition, wie sich eine Abweichung von einer Störung unterscheidet. Jede Fluggesellschaft setzt dafür einen eigenen Maßstab an.⁵⁹ Treten aber Ereignisse auf oder werden vorhergesagt, welche den Betrieb negativ beeinflussen können, so müssen zuerst die Konsequenzen ermittelt werden, bevor entschieden wird, wie und insbesondere wann darauf zu reagieren ist. Manchmal ist auch kein konkretes Handeln erforderlich, da sich das Problem quasi von selbst erledigen wird.⁶⁰ Abbildung 2.4 illustriert nochmals den gesamten Entscheidungsprozess.

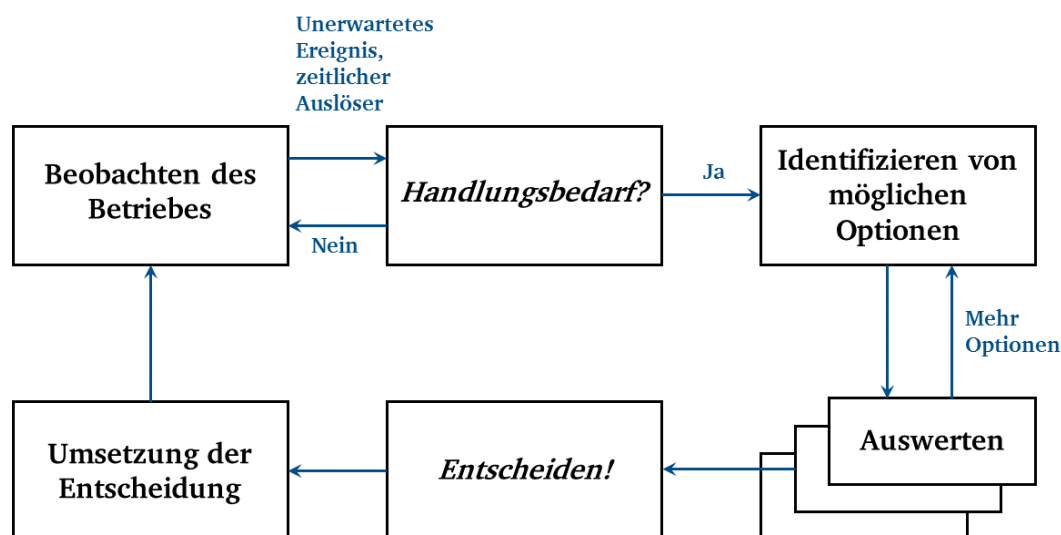


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Entscheidungsprozesses in der Verkehrszentrale
[Quelle: KOHL et al. (2007), S. 153, Übersetzung durch den Verfasser]

⁵⁸ Vgl. ALEXANDER (2013), S. 11.

⁵⁹ Vgl. WU (2010), S. 166.

⁶⁰ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 152.

Gerade das zu lange Herausögern von Entscheidungen führt oft dazu, dass nur noch teure Lösungen implementiert werden können.⁶¹ Diese folgenden Optionen werden nicht nur einzeln angewendet, sondern oft auch in Kombination. Dabei muss auch stets versucht werden, die Optionen nach verschiedenen Kriterien neben dem Ertragsverlust zu bewerten.⁶² Jede Fluggesellschaft kann dabei auch verschiedene Kriterien und Ziele anwenden.⁶³ Ohne entsprechende Unterstützung müssen sich die Mitarbeiter in der Verkehrszentrale dabei auf ihren individuellen Erfahrungsschatz und eine intuitive Entscheidungsfindung verlassen. Manchmal existieren zum Teil auch unternehmensinterne Richtlinien, etwa dass für unter 10 Anschlussreisende nicht auf diese gewartet wird oder generelle Vorgaben, nach welchen Kriterien und in welcher Reihenfolge eine Flugstreichung zu evaluieren ist.⁶⁴

Die folgenden Abschnitte geben einen umfassenden Überblick möglicher Handlungsoptionen, wie etwa das Streichen oder Verspäten von Flügen, sowie Aspekte und Kriterien, welche zur Bewertung dieser Optionen seitens der VZ herangezogen werden können und müssen.

2.1.2.1 Zeitliche Verschiebung eines Fluges

In Regel wird oft von Verspätungen im Sinne einer zeitlichen Verschiebung von Flügen geredet. Wenn es betriebliche Gründe möglich machen, stellt der zeitliche Vorzug des Abfluges eine eher seltene, aber dennoch hin und wieder angewendete Maßnahme gerade bei sehr kurzfristigen Störung dar. Wenn das Flugzeug ohne verfrühten Abflug stattdessen gar nicht abheben kann, betrifft es in Summe alle gebuchten Passagiere, anstatt nur solche, welche zum Zeitpunkt des früheren Abflugs noch nicht an Bord sind. Zudem können auch eine Reihe weiterer betrieblicher Gründe, wie etwa eine zwingend benötigte Wartung des Flugzeuges an einem anderen Flughafen, es notwendig machen, dass die sogenannte „Strandung“ des Flugzeuges vermieden wird.

Rein planungstechnisch beziehen sich Verspätungen oder Verfrühungen immer auf die Abweichung von geplanter Abflugzeit (STD) bzw. Ankunftszeit (STA).⁶⁵ Dabei beschreiben STD (Scheduled Time of Departure) und STA (Scheduled Time of Arrival) sogenannte Blockzeiten, dazwischen liegt die sogenannte Blocklänge oder -zeit.⁶⁶ Während ein Flugzeug in seiner ursprünglichen bzw. endgültigen Position steht, hat es in der Regel vor oder hinter den Rädern sogenannte Klötze (Blocks) liegen, welche ein versehentliches Wegrollen verhindern. Demnach bezieht sich die STD auf den Zeitpunkt, wenn die Klötze vor Abflug entfernt werden und die STA auf das Platzieren der Klötze nach Ankunft.

⁶¹ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 53.

⁶² Vgl. TEODOROVIĆ/STOJKOVIĆ (1995), S. 325.

⁶³ Vgl. HORTON/MURTHY (2000), S. 241.

⁶⁴ Vgl. BERDY/GERSHKOFF (2000), S. 314.

⁶⁵ Vgl. ROBERTS (2018), S. 156.

⁶⁶ Vgl. MAURER (2006), S. 200.

Für die Evaluation einer Lösung kommen neben der Höhe der resultierenden Abflugverspätung noch folgende weitere Kriterien in Frage:

- Anzahl der betroffenen Passagiere
- Anteil der Geschäftsreisenden
- Internationaler oder inländischer Flug
- Kosten

2.1.2.2 Flugstreichung

Flugstreichungen⁶⁷ sind aus Sicht der Passagiere oft die unangenehmste Art der Reaktion seitens der Fluggesellschaften, lassen sich aber aus Sicht der VZ regelmäßig nicht vermeiden. Um den Gesamtflugplan konsistent zu halten, wird allerdings oft nicht nur ein Flug gestrichen. Alternativ müssten meist ein oder mehrere kostspielige Positionierungsflüge durchgeführt werden.

In einigen Fällen gibt es auch Strategien, um Flüge (insbesondere Multisektorenflüge) zu triangulieren bzw. zusammenzulegen.⁶⁸ Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, welche der 8 möglichen Freiheiten im Luftverkehr⁶⁹ gemäß des „ICAO-Abkommens“ für die jeweilige Fluggesellschaft nach geltendem Recht gewährt werden, da Passagiere unter Umständen nicht innerhalb eines Drittstaates oder zwischen beliebigen Drittstaaten auf direktem Wege transportiert werden dürfen.⁷⁰

Als Bewertungskriterien kommen ähnlich wie bei den Verspätungen folgende Aspekte zum Einsatz:

- Anzahl der betroffenen Passagiere
- Anteil der Geschäftsreisenden
- Internationaler oder inländischer Flug
- Kosten

Dabei wurde für das Jahr 2006 für den amerikanischen Inlandsmarkt empirisch ausgewertet, dass je größer ein Flugzeug, je besser der Sitzladefaktor und je niedriger die Frequenz eines Fluges ist, desto unwahrscheinlicher ist eine Streichung im Rahmen eines Ground Delay Programms.⁷¹

⁶⁷ Flugstreichungen werden auch synonym als Annullierungen bezeichnet.

⁶⁸ Vgl. BUCHANAN (2018), S. 121.

⁶⁹ In mancher Literatur wird auch von 9 Freiheiten gesprochen, da diese das Recht auf Kabotage in zwei Fälle unterteilen.

⁷⁰ Vgl. WIESKE-HARTZ (2000), S. 31.

⁷¹ Vgl. XIONG/HANSEN (2013), S. 79.

2.1.2.3 Hinzufügen eines Fluges

Sogenannte Positionierungsflüge sind ein probates Mittel, nicht nur um Reserveflugzeuge zu einem Einsatzort oder ein Flugzeug zu einer Wartungsbasis zu transferieren. Sie können prinzipiell auch zwischen zwei beliebigen Flughäfen in den Plan gefügt werden, solange das vorgesehene Flugzeug auf dieser Strecke fliegen kann und darf sowie eine entsprechende Cockpit Crew zur Verfügung steht. Da auf einem Positionierungsflug keine Passagiere transportiert werden und daher keinen Erlös erbringen, werden sie natürlich soweit möglich vermieden.

2.1.2.4 Flugzeugwechsel

In der Regel wird bei einem Flugzeugwechsel für einen Flug ein anderes, äquivalentes Flugzeug aus der Flotte der Fluggesellschaft verwendet. Ansonsten muss sichergestellt werden, dass bei einem flottenübergreifenden Tausch das Flugzeug auch diesen Flug durchführen kann, z.B. bezüglich Reichweite und Kapazität der Passagiere. Oft betreiben Fluggesellschaften verschiedene, sogenannte Flugzeugmuster. Sowohl die IATA als auch die ICAO liefern zum standardisierten Austausch von Flugplänen eine umfangreiche Unterteilung der Flugzeuge in Gruppen und Typen als Untergruppen.⁷²

Nach dem IATA Schema betreibt Singapore Airlines beispielsweise insgesamt 106 Flugzeuge aus 4 Gruppen und 5 Typen. Die Website der Fluggesellschaft zeigt sogar, dass ihre gesamte Flotte in insgesamt 7 verschiedene Untertypen aufgeteilt ist.⁷³ Diese individuelle Unterteilung kann auf Grund verschiedener Aspekte geschehen:

Wartungsgruppe

Airbus bietet den A380 entweder mit vier Triebwerken vom Typ *GP 7200* (Hersteller Engine Alliance) oder *RR Trent 900* (Hersteller Rolls Royce) an.⁷⁴ Wenn Flugzeuge mit unterschiedlichen Triebwerken in einer Flotte betrieben werden, kann eine Unterteilung auf Grund von unterschiedlichen Qualifikationen und Berechtigungen des Wartungspersonals oder internen Strukturen und Prozessen notwendig sein.

Heimatflughafen

Analog dem Heimatflughafen für das fliegerische Personal können Flugzeuge einem Heimatflughafen zugeordnet werden, an dem sie sich regelmäßig über Nacht aufhalten und vor Ort gewartet werden. Die Fluggesellschaft Germania zum Beispiel hat Flugzeuge in Dresden, Erfurt und Nürnberg stationiert, welche regelmäßig an ihrer Basis am Flughafen in Erfurt gewartet werden.⁷⁵

⁷² Vgl. IATA (2011), S. 389–405; WIESKE-HARTZ (2000), S. 210–215.

⁷³ Vgl. https://www.singaporeair.com/de_DE/de/flying-withus/our-story/our-fleet/ (Stand 15.11.2017).

⁷⁴ Vgl. <http://www.aircraft.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/innovation/> (Stand 24.11.2017).

⁷⁵ Vgl. <https://www.flygermania.com/de-de/unternehmen/presse-medien/pressemitteilungen/pressemitteilung/germania-bezieht-hangar-1-am-flughafen-erfurt-weimar/> (Stand 24.11.2017).

Sitzkonfiguration

Als Beispiel sei hier Delta Airlines genannt, die ihre Boeing 757-200 (IATA-Gruppencode 752) mit 6 verschiedenen Sitzkonfigurationen operieren. Dabei variieren die Anzahl der Sitzplätze zwischen 168 und 199. Diese werden dazu in interne Untergruppen 752, 75D, 75G, 75H, 75P und 75S eingeteilt.⁷⁶

Der prinzipiell einfachste Tausch stellt der mit einem adäquaten Reserveflugzeug dar. Oft wird jedoch nicht nur bei einem Flug das Flugzeug getauscht, sondern gleich eine Reihe von Wechseln vollzogen, so dass möglichst auch die Folgeflüge mit getauscht werden, um die ursprünglich geplanten Umläufe weitestgehend zu erhalten.⁷⁷

2.1.2.5 Umleitungen

Gerade für Flugzeuge, die sich zum Zeitpunkt der Schließung eines Flughafens in der Luft befinden und diesen als Ziel ansteuern, muss zeitnah eine Entscheidung über einen Ausweichflughafen herbeigeführt werden. Diese wird aber in der Regel auf Grund der vielen sicherheitsrelevanten Aspekte hauptverantwortlich durch den Piloten mit Unterstützung der Verkehrszentrale getroffen.

2.1.2.6 Anpassen von Wartungs- und Bodenereignissen

Neben den Wartungsereignissen sind Flugzeuge im Rahmen sogenannter Bodenereignisse beispielsweise für Trainings blockiert oder auf Grund von geringerer Nachfrage über die Weihnachtsfeiertage temporär abgestellt. Dabei können als Maßnahmen in Störungen folgenden Optionen zur Anpassung bei Wartungs- und Bodenereignissen ergriffen werden:

- Zeitliche Verschiebung (analog zu Flügen)
- Zeitliche Verkürzung oder Verlängerung
- Streichung des Ereignisses
- Verlegung auf einen anderen, geeigneten Flughafen
- Aufteilen auf mehrere Ereignisse (Aufsplitten)

Gerade bei Wartungsereignissen muss sichergestellt sein, dass die Änderungen weiterhin den vorgegebenen Wartungsplan des Flugzeuges erfüllen. Tabelle 2.3 zeigt exemplarisch die sogenannten Ramp- und Service-Checks, welche im operativen Zeitraum erst kurzfristig geplant werden, sowie größere Wartungsereignisse, die im Rahmen der Steuerung berücksichtigt werden müssen.

⁷⁶ Vgl. https://de.delta.com/content/www/en_US/traveling-with-us/airports-and-aircraft/Aircraft.html (Stand 24.11.2017).

⁷⁷ Vgl. YU/QI (2004), S. 59.

| Ereignis | Intervall | Arbeitsumfang | Bodenzeit | Arbeitsstunden |
|-----------------|---------------------|--|---------------|----------------|
| Preflight-Check | vor jedem Flug | Überprüfung auf äußerlich sichtbare Beschädigungen | 30–60 Minuten | 1 |
| Ramp-Check | täglich | Optische Überprüfung wie Preflight-Check plus Prüfung von Reifendruck, Bremsabnutzung, Feuerlöscher, Sauerstoffsystem; Nachfüllen von Wasser, Luft, Öl, Hydraulikflüssigkeit; Cockpit-Checks | 2,5–5 Stunden | 4–35 |
| Service-Check | wöchentlich | Ramp-Check plus detaillierte Tests der Technik; Service von Reifen und Bremsen | 2,5–5 Stunden | 7–55 |
| A-Check | 350–650 Flugstunden | S-Check plus Überprüfung von Systemen, die für den Flugbetrieb wichtig sind, Triebwerks- und Funktionskontrollen | 5–10 Stunden | 25–145 |
| C-Check | nach 15–18 Monaten | A-Check plus detaillierte Kontrollen der Flugzeugstruktur, gründliche Systemtests; teilweise Freilegung der Verkleidung für gründliche Prüfungen | 40–48 Stunden | 550–1350 |

Tabelle 2.3: Ausschnitt aus beispielhaftem Wartungsplan für ein Langstreckenflugzeug [Quelle: Angepasst aus MAURER (2006), S. 205]

In der Regel werden Wartungsereignisse etwas vor ihrer Fälligkeit und in der Dauer mit mehr Puffer als notwendig geplant, so dass ein gewisser Spielraum entsteht. Abgesehen von den Passagieraspekten gelten zur Anpassung ähnliche Bewertungskriterien wie bei den Flügen.

2.1.2.7 Crewwechsel

Im Fall einer Verspätung ist es meist notwendig, dass der Creweinsatz die Pläne des eingesetzten Personals auf Legalität prüft und gegebenenfalls einen Crewwechsel einleiten muss.

Bei einem Crewwechsel für einen Flug muss zwingend berücksichtigt werden, dass in der Regel die Qualifikation von Piloten und Flugbegleitern an einen gewissen Flugzeugtyp gebunden sind, und daher nicht auf jedem beliebigen Flugzeug eingesetzt werden dürfen. Welcher Flugzeugtyp mit welchem Type Rating (Musterberechtigung) geflogen werden kann, wird durch die nationalen Luftfahrtbehörden geregelt. Für gewisse Flughäfen wie in Lugano (Schweiz) oder in Funchal (Madeira, Portugal) kann darüber hinaus eine Sonderqualifikation der Piloten auf Grund der geographischen Lage oder speziellen Vorschriften beim An- oder Abflug notwendig sein.

Darüber hinaus muss sichergestellt sein, dass insgesamt ausreichend Personal für den Flug vorgesehen ist. Die IATA unterscheidet insgesamt zwischen vier verschiedenen Positionen im Cockpit und drei in der Kabine. Die Anzahl der benötigten Positionen des fliegenden Personals im aktiven Dienst pro Flug richtet sich nach verschiedenen Faktoren. Bei Flugbegleitern beispielsweise richtet sich diese nach Fluglänge, Anzahl der Notausgänge und/oder Sitzen im Flugzeug sowie den angebotenen Serviceleistungen auf dem Flug.

Außerdem muss die eingesetzte Crew stets über ausreichend verbleibende Dienstzeit verfügen. Es gibt dazu komplizierte Unternehmensvereinbarungen, Vereinbarungen mit Gewerkschaften sowie gesetzliche Regulationen über die maximale (Flug-)Dienstzeit.⁷⁸ Die gesetzlichen Vorgaben sind wiederum von den nationalen Luftfahrtbehörden, wie beispielsweise der EU-OPS⁷⁹, abhängig. Nach einer Schicht muss für gewöhnlich eine gewisse Ruhezeit eingehalten oder freie Tage gewährt werden, welche sich in der Regel nach Fluglänge und Anzahl der überflogenen Zeitzonen richtet.⁸⁰

Die einfachste Form des Crewwechsels stellt dabei in der Regel der Einsatz einer Reserve- oder Standby-Crew dar.

2.1.2.8 Umbuchen von Passagieren

Damit Passagiere bei Abweichungen ihren Zielort überhaupt auch erreichen können, kann bei Streichungen oder größeren Verspätungen eine Umbuchung auf einen anderen Flug mit noch freier Kapazität notwendig werden. Um die „richtige“ Entscheidung zu treffen, werden weitreichende Informationen zu den Passagieren, wie etwa

- Sitzplatzklasse (z.B. Business oder Economy Class) pro Flug
- Vielflieger-Status
- Buchungsklasse (z.B. Flex- oder Rabatt-Ticket)
- Spezielle Serviceanforderungen (z.B. mobilitätseingeschränkter Reisender)
- Anschlussflüge (auch auf Partner-Fluggesellschaften)
- Zugehörigkeit zu einer Reisegruppe

in den Computersystemen abgerufen.⁸¹

⁷⁸ Vgl. GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 327f.

⁷⁹ Verordnung (EG) Nr. 8/2008 der Kommission der Europäischen Gemeinschaften, online verfügbar unter <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/8bf45efe-b607-49e4-81a0-f6c4732204a5/language-de/format-PDF> (Stand: 02.02.2018).

⁸⁰ Vgl. SONG/WEI/YU (2002), S. 265.

⁸¹ Vgl. FRANZI (2018), S. 186; HORSWELL (2018), S. 303; ZIMMERMANN (2018), S. 311.

Bei einer Umbuchung müssen jedoch nicht nur die anstehenden Kosten wie beispielsweise für Verpflegung und Übernachtung oder ein zusätzliches Flugticket unter Umständen bei einer fremden Fluggesellschaft betrachtet werden, sondern gegebenenfalls auch noch zusätzliche Entschädigungszahlungen.

Insbesondere mögliche Entschädigungen nach geltendem EU-Recht⁸² sind für alle betroffenen Flüge aus der EU sowie für Flüge in die EU von dort ansässigen Fluggesellschaften zu beachten. So haben Passagiere neben dem Recht auf Beförderung unter Umständen ein Recht auf Entschädigung bei Streichungen und Verspätungen, aus Sicht der Fluggesellschaft selbst stellenweise für Ursachen, welche sie gar nicht selbst zu verantworten haben.⁸³ Die Höhe der Entschädigungszahlung kann dabei pro Passagier grundsätzlich zwischen 250, 400 und 600 EUR abhängig von Verspätungsdauer und Entfernung von Start- und Zielflughafen betragen.

Oft werden auch Transportmittel am Boden wie Zug oder Bus bei kürzeren Strecken als Alternative betrachtet, gerade wenn es sich um die letzten Abschnitte der Reise eines Passagiers handelt.⁸⁴

2.1.3 Vorbeugende Steuerungskonzepte

Die im vorherigen Abschnitt dargestellten Maßnahmen werden in aller Regel im Rahmen eines reaktiven Managements eingesetzt, bei denen auf eine eingetretene Störung oder Abweichung reagiert wird. Im Gegenzug dazu steht die vorausschauende und vorbeugende Steuerung, bei der bereits im Vorfeld für ein möglicherweise noch eintretendes Ereignis präventive Maßnahmen ergriffen werden.

Gerade um die in Abschnitt 2.1.1.9 beschriebenen, kaskadierenden Effekte frühzeitig zu stoppen, können kritische Verspätungspfade identifiziert werden, um daraus entsprechende, proaktive Maßnahmen zur Vermeidung abzuleiten.⁸⁵ Als weiteres Beispiel hat Continental Airlines einen Prozess zur vorzeitigen Anpassung von Flugplänen entwickelt, so dass bei einer Vorhersage von schlechtem Wetter in einer Region Umläufe von Flugzeugen und Crews angepasst werden, damit in einem potentiellen Störfall möglichst wenige Ressourcen in der betroffenen Region „stranden“.⁸⁶

⁸² Das EU-Recht bezieht sich hier zum einen auf die Verordnung (EG) Nr. 261/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates, verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX:32004R0261> (Stand: 12.01.2018), sowie zum anderen auf die Urteile des Europäischen Gerichtshofes in den Rechtssachen Sturgeon (C-402/07) und Folkerts (C-11/11).

⁸³ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 138.

⁸⁴ Vgl. VOLTES-DORTA/RODRÍGUEZ-DÉNIZ/SUAU-SANCHEZ (2017), S. 457.

⁸⁵ Vgl. ABDELGHANY et al. (2004b), S. 393f.

⁸⁶ Vgl. CLARKE (1998b), S. 71f.

Allerdings besteht mit einer solchen Strategie ein gewisses Risiko dahingehend, dass Anpassungen vorgenommen werden, die im Nachhinein nicht notwendig gewesen wären. Es ist daher erforderlich, ein derartiges Vorgehen wirtschaftlich gegen die Unsicherheiten von Vorhersagen abzuwägen.⁸⁷

2.1.4 Beziehung zum Flugplanungsprozess

Zwei Tage bis zwei Wochen vor Durchführung übernimmt die Verkehrszentrale in der Regel die Aussteuerung des Flugplanes von den Planungsabteilungen.⁸⁸ Aus Sicht des operativen Managements haben bereits ein Jahr oder mehr an komplexen Planungstätigkeiten stattgefunden, bis alle Pläne vollständig und detailliert aufgebaut sind. Fluggesellschaften planen ihren Betrieb mit viel Aufwand und sehr filigran, lassen viele unterschiedliche Ziele einfließen.⁸⁹ Um später einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten, werden Pläne neben dem Ziel der maximalen Ressourcenausnutzung oft auch gegen eine Reihe von potentiellen Störungen robust geplant.

2.1.4.1 Exemplarischer Planungsprozess

Bis zur Übernahme durch die VZ sind die verschiedenen strategischen Planungsabteilungen verantwortlich, die in einzelnen Teilschritten etwa 3 Jahre im Voraus iterativ einen vollständigen Flugplan erzeugen sowie im Rahmen der taktischen Planung etwa ab 6 Monate vorher dann die konkreten Pläne für den Flugzeug- sowie Creweinsatz generieren. Dabei ist der Creweinsatz nochmals in zwei Schritte namens Pairing und Rostering unterteilt. Pairing bezeichnet dabei das Bilden von anonymen Flugumläufen für Crews einer Basis. Im Rahmen des Rosterings werden die Pairings dann konkreten Piloten und Flugbegleitern unter Berücksichtigung von Urlaub, freien Tagen und Schulungsblöcken zugeordnet. Während im operativen Betrieb alle Aspekte von Flugzeug, Crew und Passagiere sowie Fracht gleichzeitig betrachtet werden, durchläuft der Planungsprozess meist separate und teils iterative Schritte, wie Abbildung 2.5 exemplarisch aufzeigt.

Da das operative Management sich in der Regel nur darum kümmert, dass Pläne innerhalb des operativen Zeitraumes konsistent gehalten werden, müssen längerfristige Probleme zurück an die taktische Planung adressiert werden. Eine Umplanung am aktuellen Tag kann beispielsweise dazu führen, dass der aktuelle Einsatzplan für ein Flugzeug in einer Woche nicht mehr gültig ist, da ein Wartungsereignis nun früher als geplant fällig wird. Dieses Problem muss dann seitens der taktischen Planung behoben werden, da das Problem in deren Zuständigkeitszeitraum fällt.

⁸⁷ Vgl. NIZNIK (2017), S. 12.

⁸⁸ Vgl. BERDY/GERSHKOFF (2000), S. 313.

⁸⁹ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 6.

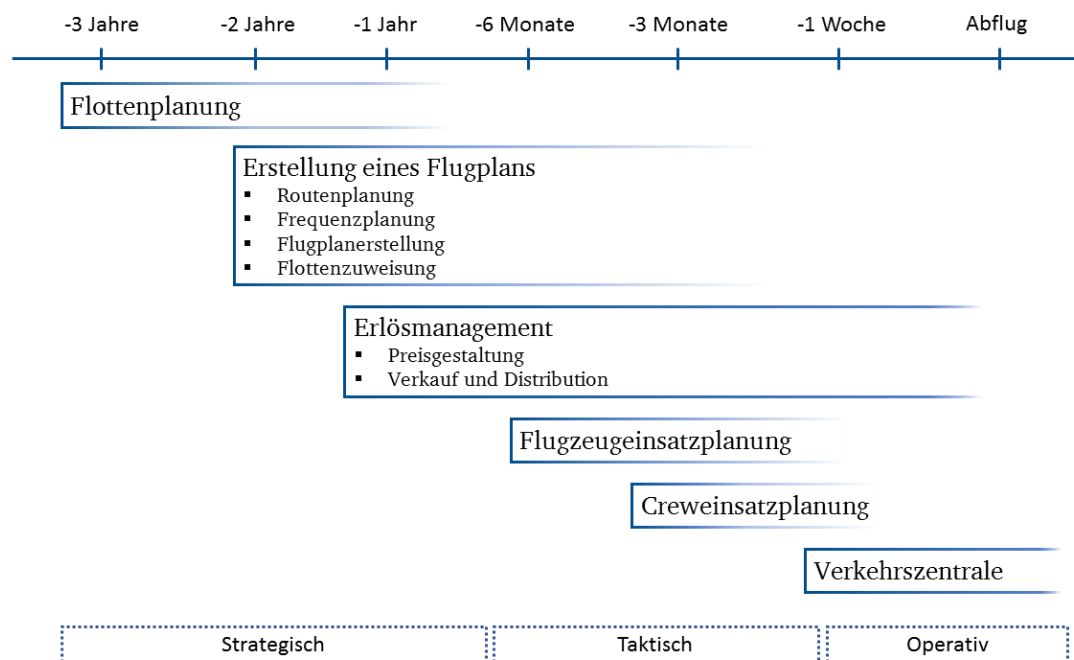


Abbildung 2.5: Exemplarischer Planungsprozess von Fluggesellschaften [Quelle: Angepasst und übersetzt aus COOK/BILLIG (2017), S. 131, sowie VON GÖTZ (2005), S. 150.]

2.1.4.2 Robuste Flug- und Einsatzpläne

Um später ein zielorientiertes operatives Management zu ermöglichen, können bereits die Pläne während des Planungsprozesses in ihrer Empfindlichkeit auf Störungen robuster gemacht werden. Dazu werden entsprechende stochastische Aspekte in die Planungsalgorithmen integriert. Die Robustheit kann dabei in den Ausprägungen Stabilität und Flexibilität gemessen werden.⁹⁰

In stabilen Plänen sind Puffer eingebaut, um kleinere Verspätungen zu „absorbieren“ und es werden Reserven von Crews und Flugzeugen vorgehalten, welche einen Ausfall übernehmen können.⁹¹ Für flexible Pläne werden viele Tauschmöglichkeiten zum Beispiel durch einen geringen Flottenmix an verschiedenen Flughäfen und kurze Zyklen für Flugzeugumläufe (häufig wiederkehrend am selben Flughafen) eingeplant, so dass in Störfällen ausreichend Handlungs- und Tauschoptionen bestehen und die Pläne schnell wieder in einen regulären Betrieb überführt werden können.⁹²

Beide Ansätze basieren auf der Annahme, dass sich die Senkung der Produktivität im Vergleich zu den möglicherweise anfallenden, zusätzlichen Störungskosten trotzdem amortisieren wird.⁹³ Zukünftig könnte auch die Robustheit der Pläne erhöht werden, wenn anstatt eines sequenti-

⁹⁰ Vgl. CLAUSEN et al. (2010), S. 820; CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 132.

⁹¹ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 24.

⁹² Vgl. SMITH/JOHNSON (2006), S. 501; ROSENBERGER/JOHNSON/NEMHAUSER (2004), S. 358.

⁹³ Vgl. BRUCE (2018), S. 326.

ellen ein integrierter Planungsprozess realisiert werden würde.⁹⁴ Um dabei die Robustheit und Flexibilität der Pläne in der Praxis zu überprüfen, können Simulationsmethoden im Rahmen der Planungsphase eingesetzt werden.⁹⁵

Abschließend muss festgestellt werden, dass die Robustheit von Plänen eine hinreichende Bedingung ist, um die notwendige Aufgabenerfüllung der Verkehrszentrale in effizienter Weise zu ermöglichen.⁹⁶

2.1.4.3 Dynamische Planung

Da mehr als 70% der Ereignisse in den letzten vier Wochen vor Durchführung noch verschiedener Änderungen unterliegen, existiert theoretisch auch die Möglichkeit, dass einzelne Teilschritte der Planung (insbesondere Flottenzuweisung und Flugzeugeinsatz) weiter in Richtung des operativen Zeitraumes verschoben werden, wie das Konzept der dynamischen Planung zeigt.⁹⁷

In großen Inlandsmärkten wie den USA ist es bei Einsatz eines geeigneten Flottenmixes prinzipiell möglich und sinnvoll, noch im operativen Zeitraum die Flugzeug- und Creweinsatzpläne kurzfristig und flexibel an die Nachfrage anzupassen, um so beispielsweise die Erlöse zu steigern.⁹⁸ In Europa ist die Realisierung eines solchen Vorgehens auf Grund der vielen gesetzlichen Regularien und starren Vorgaben allerdings nur schwer vorstellbar.

2.2 Aufbau und Organisation

Um die verschiedenen Aufgaben aus Kapitel 2.1 effektiv bewältigen zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die interne Struktur einer Verkehrszentrale aufzubauen und zu gestalten.⁹⁹ Sowohl in Praxis als auch Wissenschaft haben sich deshalb verschiedene, englischsprachige Termini für die Verkehrszentrale einer Fluggesellschaft entwickelt:

- Operations Control Center (OCC)
- Airline Operations Control Center (AOCC/AOC)¹⁰⁰
- Integrated Operations Control Center (IOCC/IOC)
- System Operations Control Center (SOCC/SOC)
- Hub Operations Control Center (HOCC/HOC)
- Network Operations Control Center (NOCC/NOC)

⁹⁴ Vgl. WU (2010), S. 212.

⁹⁵ Vgl. BALL et al. (2007), S. 38; ROSENBERGER et al. (2002), S. 371.

⁹⁶ Vgl. BALL et al. (2007), S. 50.

⁹⁷ Vgl. VON GÖTZ (2005), S. 152; STOJKOVIĆ et al. (2002), S. 785.

⁹⁸ Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 154.

⁹⁹ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 133.

¹⁰⁰ An dieser Stelle ist die Abkürzung AOC nicht mit dem Air Operator Certificate zu verwechseln.

Diese verschiedenen Bezeichnungen repräsentierten dabei meist die speziellen organisatorischen Aspekte abhängig vom Typus der Fluggesellschaft. Daher sollen in den folgenden Abschnitten die typischerweise existierenden Funktionsbereiche beschrieben werden, bevor anhand verschiedener organisatorischer Aspekte aufgezeigt wird, wie flexibel und angepasst eine Fluggesellschaft diese Verkehrszentrale organisieren kann und wie entsprechende Entscheidungsprozesse zwischen den Einheiten gestaltet sind.

2.2.1 Funktionsbereiche und deren Aufgaben

Obwohl der Aufbau von Fluggesellschaft zu Fluggesellschaft prinzipiell unterschiedlich sein kann, haben sich zur Erfüllung der Aufgaben aus Abschnitt 2.1 notwendige Funktionsbereiche gebildet, welche in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt sind.

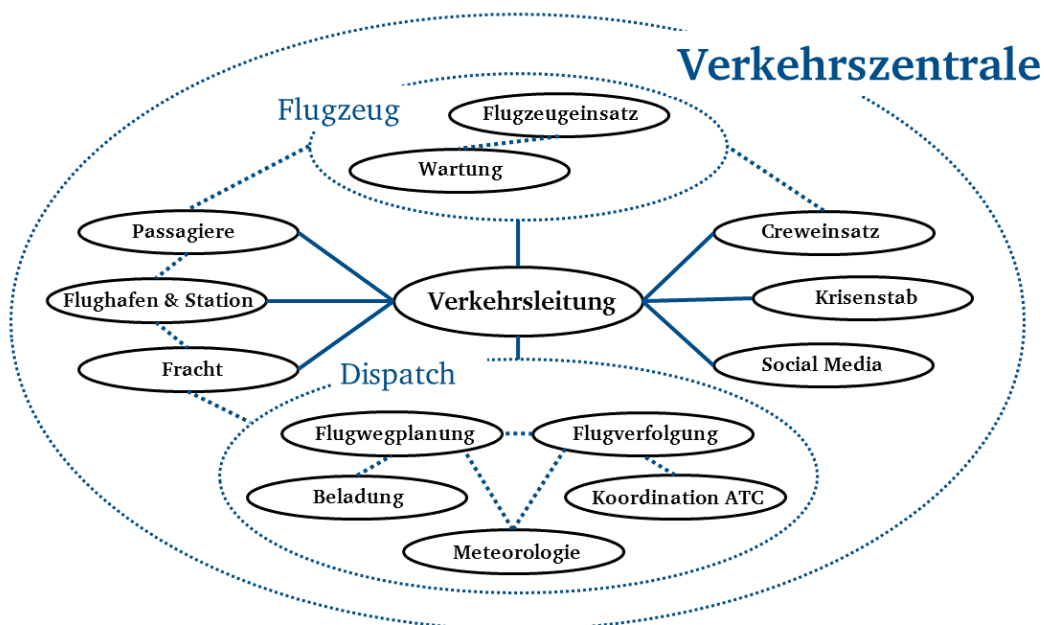


Abbildung 2.6: Übersicht der möglichen Funktionsbereiche in der Verkehrszentrale

In den folgenden Abschnitten sollen die Funktionen aller in Abbildung 2.6 dargestellten Bereiche genauer beschrieben werden.

2.2.1.1 Beladungsplanung und -kontrolle

Die Beladungsplanung und -kontrolle stellt sicher, dass ein Flugzeug in sicherer und effizienter Weise beladen ist.¹⁰¹ Dazu gehört neben der Berücksichtigung der maximalen Zuladung von Fluggästen, Fracht und Treibstoff (Weight) insbesondere auch die konkrete Planung, wo etwas im

¹⁰¹ Vgl. AVERY (2018), S. 220.

Flugzeug geladen wird (Balance). Heute übernehmen IT-Systeme weitestgehend die Kalkulation, bei der komplexe Vorschriften eingehalten werden müssen. Des Weiteren müssen Absprachen mit der Flugwegplanung und der Frachtsteuerung getroffen werden. Auf Grundlage der Berechnung werden dann vielfältige Dokumentationen erstellt, welche dann unter anderem an die Piloten und das Abfertigungspersonal verteilt werden.

2.2.1.2 Creweinsatzsteuerung

Für viele Fluggesellschaften ist die Steuerung des Creweinsatzes eine der wichtigsten Aufgaben innerhalb der Verkehrszentrale.¹⁰² Die Wichtigkeit der Aufgabe resultiert zum einen Teil daher, dass die Planung des fliegenden Personals (Crew) auf Grund der umfangreichen unternehmensinternen Regularien und Gesetzen sehr komplex ist, zum anderen, dass die Anzahl der Piloten und Flugbegleiter oft deutlich größer ist als die Anzahl der Flugzeuge. Personen in dieser Funktion sind daher oft erfahrene Mitarbeiter aus der Crewplanung.¹⁰³

Neben der Durchführung von Crewwechseln steht die Creweinsatzsteuerung auch in Kontakt mit dem fliegerischen Personal, um diese über aktuelle Änderungen zu informieren. Darunter fällt zum Beispiel das Anrufen und Einsetzen von Reservecrews. Im Störfall werden bei Bedarf für die Piloten und Flugbegleiter auch Übernachtungen außerhalb der Basen oder anderweitige Transfers wieder zurück zur Heimatbasis arrangiert.¹⁰⁴ Bei einem Transfer kann eine Crew auf einem Flug auch als normaler Passagier transportiert werden, also ohne dabei einen aktiven Dienst wahrzunehmen.¹⁰⁵

Analog zum Planungsprozess kann eine Steuerung auf Pairing- und Rostering-Ebene in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt sein.¹⁰⁶ Gerade Vorgaben zum Datenschutz etwa durch internationales oder nationales Recht, Tarifverträge oder Betriebsvereinbarungen können es erforderlich machen, dass Pairings und Rosterings durch getrennte Abteilungen gesteuert werden, da Namen, Kontaktdaten sowie vollständige Einsatzpläne des fliegerischen Personals nicht in allen Bereichen der Verkehrszentrale uneingeschränkt zugänglich sein dürfen.

2.2.1.3 Stations- bzw. Flughafensteuerung

Dieser Bereich überwacht, steuert und koordiniert die Prozesse der Flugzeug- und Passagierabfertigung an den verschiedenen Flughäfen. An größeren Flughäfen mit entsprechendem Flugprogramm verfügen Fluggesellschaften für die Abfertigung oft über eigene bzw. exklusive Personalressourcen und Ausrüstung. An kleineren Flughäfen werden die Aufgabenteile oft auch durch Dritte für mehrere Airlines durchgeführt, so dass hier die Abstimmung mit einem oder mehreren Dienstleistern notwendig ist.

¹⁰² Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 131.

¹⁰³ Vgl. IRRGANG (2000), S. 186.

¹⁰⁴ Vgl. FENNELL (2018), S. 135f.

¹⁰⁵ Vgl. HORSWELL (2018), S. 295.

¹⁰⁶ Vgl. ABDI/SHARMA (2007), S. 121.

Größere Fluggesellschaften besitzen an ihren Hubs oft auch eigene Terminalbereiche bzw. -anlagen, so dass sie selbst ohne umfangreiche Abstimmung mit dem Flughafen oder anderen Fluggesellschaften für das Gatemanagement zuständig sind.¹⁰⁷

Diese Gesamtheit der zu steuernden Prozesse werden auch als Bodenverkehrsdienste (BVD) bezeichnet, welche sich im Detail aus

- Fluggastabfertigung,
- Gepäckabfertigung,
- Fracht- und Postabfertigung,
- Vorfelddienste,
- Reinigungsdienste und Flugzeugservice,
- Betankungsdienste,
- Stationswartungsdienste,
- Flugbetriebs- und Besatzungsdienste,
- Transportdienste am Boden und
- Catering

zusammensetzen.¹⁰⁸

2.2.1.4 Flugverfolgung

Im Rahmen der Flugverfolgung wird die Unterstützung der Cockpit Crew während des Fluges sichergestellt.¹⁰⁹ Auf Grund eines spontanen meteorologischen Ereignisses, welches zum Zeitpunkt der Planung nicht bekannt war, kann etwa das Umfliegen eines Gewitters notwendig werden. Vom Boden aus können dann nun aktuelle Wetterinformationen durchgegeben und alternative Flugrouten zur Abstimmung mit der Flugsicherung vorgeschlagen werden, die einen sicheren und effizienten Flugweg zum Ziel ermöglichen.¹¹⁰

Personal, welches in dieser Funktion arbeitet, benötigt eine Lizenzierung und wird von einem sogenannten Flugdienstberater oder auch Dispatcher übernommen.¹¹¹

¹⁰⁷ Vgl. BRUCE (2018), S. 331; GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 329.

¹⁰⁸ Vgl. MENSEN (2013), S. 609–611.

¹⁰⁹ Vgl. KIM (2018), S. 239.

¹¹⁰ Vgl. ABDI/SHARMA (2007), S. 122; GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 326.

¹¹¹ Vgl. KIM (2018), S. 239.

2.2.1.5 Flugwegplanung

Zur Hauptaufgabe der Flugwegplanung gehört in erster Linie die vollständige und sichere Planung eines Fluges. Zur Flugwegplanung gehört neben der Bestimmung des genauen Flugweges unter Berücksichtigung von Wetter, Vorschriften und Regularien auch die Abstimmung mit der Beladungsplanung und -kontrolle sowie der Flugverkehrskontrolle. Besonderer Fokus wird hierbei auf die Treibstoffplanung sowie die ETOPS (Extended Operations) Planung bei langen Flügen über große Gebiete ohne Ausweichflughäfen entlang der Flugroute gelegt.¹¹² Die erstellten Pläne werden vor Durchführung mit den nationalen und internationalen Flugverkehrskontrollen final abgestimmt.

Mitarbeiter, welche in diesem Aufgabenfeld tätig sind, benötigen ebenfalls eine Lizenzierung zum Flugdienstberater.¹¹³

2.2.1.6 Flugzeugeinsatz

Im Rahmen des Aufgabengebietes Flugzeugeinsatz wird sichergestellt, dass jeder Flug von einem technisch adäquaten und verfügbaren Flugzeug geflogen wird.¹¹⁴ Dazu zählt auch, dass entsprechend benötigte Wartung an diesem Flugzeug durchgeführt wurde. Ebenso obliegt dem Flugzeugeinsatz die Verwaltung von Reserveflugzeugen, die als Ersatz für verspätete oder defekte Maschinen vorgehalten werden.¹¹⁵ Einige Fluggesellschaften mieten auch Flugzeuge bei einem externen Anbieter, falls sie eine Ersatzmaschine benötigen.¹¹⁶

Oft arbeitet der Flugzeugeinsatz nahe an der Schnittstelle zum Planungsprozess, um die Flugzeugumläufe aus der initialen Planung mit denen im aktuellen Zeitraum zu synchronisieren.

2.2.1.7 Frachtsteuerung

Die Frachtsteuerung überwacht und steuert die zu erfüllenden Frachtaufträge.¹¹⁷ Da die Flüge für ein Frachtgut lediglich einen Teil der Reise darstellen, bildet die Frachtsteuerung somit insbesondere die Schnittstelle zu den beauftragenden Frachtführern, den Spediteuren sowie den Betreibern der Fracht-Terminals. Gerade für Fracht-Fluggesellschaften oder die Fluggesellschaft eines Integrators ist diese Aufgabe natürlich von zentraler Bedeutung. Das Beispiel von China Southern Airlines aus 2013 zeigt, dass diese Funktion die Schnittstelle zu 11 unterschiedlichen Frachtführern bedeuten kann.¹¹⁸

¹¹² Vgl. KIM (2018), S. 245–252; LAUBER (2000), S. 25.

¹¹³ Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 147.

¹¹⁴ Vgl. HORTON/MURTHY (2000), S. 244f.

¹¹⁵ Vgl. IRRGANG (2000), S. 181f.

¹¹⁶ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 23.

¹¹⁷ Vgl. ABDI/SHARMA (2007), S..

¹¹⁸ Vgl. FENG/LI/SHEN (2015), S. 272.

Aber auch reine Passagier-Fluggesellschaften können zusätzlich Fracht im Bauch der Flugzeuge transportieren.¹¹⁹ In der Regel werden keine Passagiere oder Gepäck für Fracht stehen gelassen, einige Fluggesellschaften planen deshalb extra mit weniger Passagieren, um wertvolle Fracht zu transportieren.¹²⁰ Einige größere Fluggesellschaften operieren häufig neben den Passagiermaschinen eine eigene Teilflotte aus reinen Frachtflugzeugen.¹²¹ Einige wenige betreiben sogenannte Kombi-Flugzeuge, die entweder dauerhaft auf den Passagierdecks zusätzliche Frachträume installiert haben oder die sich durch einen kurzen Umbau zwischen Fracht- und Passagierflugzeug wandeln können.¹²²

2.2.1.8 Koordination mit den Flugverkehrskontrollen

Viele Fluggesellschaften verfügen über eigene Koordinatoren, welche die Abstimmung der Flugwegplanung mit den zuständigen Flugverkehrskontrollen, oder im Englischen auch ATC (Air Traffic Control), durchführen.¹²³ In den USA ist dies etwa die FAA¹²⁴, in Europa die EUROCONTROL¹²⁵ für den oberen Luftraum und in Deutschland die DFS¹²⁶ für den unteren Luftraum. Dabei trennen sich oberer und unterer Luftraum bei etwa 7500 Meter.¹²⁷ Diese Koordinatoren sind meistens speziell geschulte Flugdienstberater.

Eine der Hauptaufgaben ist die Abstimmung von Flugwegplänen mit der Flugverkehrskontrolle und insbesondere die Koordination der sogenannten Airway-Slots, also dem Kontingent von Start- und Landerechten an den Flughäfen. Etwa 2/3 aller Flüge unterliegen solchen Restriktionen.¹²⁸ Diese Funktion ist auf Grund der unmittelbaren Nähe zur Flugwegplanung in der Regel innerhalb oder als Teil dieser etabliert.

Gerade an Slot-koordinierten Flughäfen, wie zum Beispiel Frankfurt oder London, sind die Starts und Landungen von Flugzeugen stark reglementiert. Daher sind die Abflugs- bzw. Ankunftszeiten in Slots organisiert. Falls ein Flug seinen geplanten Abflugsslot nicht wahrnehmen kann, z.B. weil es zu einer Verzögerung bei der Abfertigung kam, bekommt er in der Regel seitens der Flugverkehrskontrolle einen neuen Slot zugewiesen. Der zuständige Koordinator einer Fluggesellschaft hat dann die Möglichkeit, falls seine Fluggesellschaft mehrere Slots zur Verfügung hat, die Zuordnung der Flüge zu den Slots in Abstimmung mit ATC gegebenenfalls nochmal zu tauschen bzw. zu ändern.

¹¹⁹ Vgl. HORTON/MURTHY (2000), S. 245.

¹²⁰ Vgl. JOFRÉ/IRRGANG (2000), S. 267f.

¹²¹ Vgl. DONNISON (2018), S. 209.

¹²² Vgl. JOFRÉ/IRRGANG (2000), S. 268.

¹²³ Vgl. KIM (2018), S. 244.

¹²⁴ www.faa.gov.

¹²⁵ www.eurocontrol.int.

¹²⁶ www.dfs.de.

¹²⁷ Vgl. MAURER (2006), S. 133.

¹²⁸ Vgl. VON GÖTZ (2005), S. 151.

2.2.1.9 Krisenstab

Im Falle einer größeren Störung, etwa eines Streikes oder eines Unfalles haben Fluggesellschaften die Funktion eines Krisenstabs etabliert.¹²⁹ Dieser besteht in der Regel aus entsprechenden unternehmensweiten Vertretern, die im Falle einer Krise einberufen werden. Dazu gehören neben den einzelnen Funktionen aus der Verkehrszentrale auch höheres Management sowie Marketing und Kommunikation. Im Rahmen von Sitzungen werden dort die allgemeinen Zielrichtungen und Handlungsmaßnahmen, in die gerade bei Streiks auch unternehmenspolitische Gründe einfließen, erörtert und festgelegt. Diese Vorgaben werden dann von der Verkehrszentrale entsprechend umgesetzt. Im Katastrophenfall werden auch weitere, unternehmensweite Notfallmechanismen und -teams eingeschaltet.¹³⁰

Wie der Unfall einer Boeing 777 von British Airways am Londoner Flughafen Heathrow im Jahr 2008 zeigt, kann ein nicht angepasstes Handeln und schlechte Kommunikation seitens der Fluggesellschaften in einer solchen Situation sogar zur Schädigung der Marke führen.¹³¹

2.2.1.10 Meteorologie

Einige Fluggesellschaften besitzen eigene Meteorologie-Abteilungen, in denen Spezialisten aktuelle Wetterlagen und Vorhersagen auswerten und analysieren. Diese stellen ihre Erkenntnisse der Verkehrszentrale zur Verfügung und weisen andere Funktionen auf mögliche Auswirkungen für den Flugbetrieb hin.¹³²

2.2.1.11 Passagierbuchungssteuerung

In komplexen Netzwerken fliegen Passagiere im Rahmen ihrer Reise oft mehrere Flüge direkt hintereinander ab. Dabei ist es nicht unüblich, dass innerhalb des Reiseweges verschiedene Fluggesellschaften involviert sind. Als Beispiel verkauft Lufthansa folgende Flüge im Winterflugplan 2017/2018 von Luxemburg (LUX) über Frankfurt (FRA) und Houston (IAH) nach New Orleans (MSY):

- LUX - FRA - LH399 - Durchführt im Wetlease¹³³ von Lufthansa CityLine
- FRA - IAH - LH440
- IAH - MSY - LH8639 - Durchgeführt im Codeshare¹³⁴ mit United Airlines

¹²⁹ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 134.

¹³⁰ Vgl. NOMURA (2003), S. 476.

¹³¹ Vgl. GRUNDY/MOXON (2013), S. 60.

¹³² Vgl. GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 326f.

¹³³ Unter einem Wetlease versteht man die Ausführung eines eigenen Fluges durch eine andere Fluggesellschaft mit deren Flugzeug und Crew.

¹³⁴ Ein Codeshare-Flug ist ein Flug einer anderen Fluggesellschaft (Operating Carrier), die eine zusätzliche eigene Flugnummer besitzt (Marketing Carrier).

Bei Störungen müssen zum Beispiel gestrandete Passagiere, welche ihren Anschluss nicht erreichen können, dann auf alternative Reisemöglichkeiten (eigene oder fremde Flüge oder Bodentransporte wie Bus oder Bahn) umgebucht werden und sogar bei längerer Verzögerung in Hotels übernachten. Die Passagierbuchungsplanung unterstützt somit auch das Personal an den Gates und Informationsständen vor Ort oder noch direkt im Flugzeug.

Die Passagierbuchungssteuerung achtet bei ihren Entscheidungen in der Regel besonders auf die erzielten Erlöse bzw. die zusätzlichen Kosten (z.B. Kompensationen, Übernachtungen).¹³⁵ Da die Wirtschaftlichkeit im Fokus steht, wird diese Funktion manchmal auch als kommerzielle Steuerung bezeichnet.¹³⁶

2.2.1.12 Social Media

Relativ neu in der Verkehrszentrale ist die Funktion von Social Media-Beauftragten.¹³⁷ Sie beobachten, welche Reaktionen betroffene Passagiere auf die Störung und deren Maßnahmen seitens der Fluggesellschaften in den sozialen Medien absetzen. So ist es möglich, auf negative Anmerkungen entsprechend zu reagieren, um so den Passagieren auf öffentlichkeitswirksame Art und Weise entsprechende Unterstützungsleistungen und Alternativen anbieten zu können.

2.2.1.13 Wartungssteuerung

Im Bereich der Wartung wird der technische Zustand der Flugzeuge überwacht, ebenfalls eine der wichtigsten Aufgaben innerhalb der Verkehrszentrale.¹³⁸ Im Falle eines Defektes oder einer technischen Einschränkung werden entsprechende Informationen und Aufträge an die Technikabteilungen vor Ort weitergeben. Zudem plant die Wartungssteuerung auch kurzfristige Wartungsereignisse, die z.B. alle 48 Stunden durchgeführt werden müssen, ein.

Falls Material und Personalplanung für die Wartungsarbeiten und Flugzeuge an den einzelnen Wartungsstandorten vor Ort geplant und gesteuert wird, übernimmt der Flugzeugeinsatz oft die zentrale Koordination zur Wartung. Viele größere Fluggesellschaften haben eigene Wartungsfirmen mit entsprechenden Wartungseinrichtungen (Hangars) oder exklusive Verträge, während an kleineren Flughäfen dies oft durch einen dritten Dienstleister geschieht.

¹³⁵ Vgl. BUCHANAN (2018), S. 122.

¹³⁶ Vgl. ABDI/SHARMA (2007), S. 122.

¹³⁷ Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 149; STECHER (2016), S. 30.

¹³⁸ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 131.

2.2.1.14 Verkehrsleitung

Eine Instanz muss letztlich die bisher aufgeführten Aufgabenfelder zusammenführen und koordinieren, um letztendlich finale Entscheidungen zu treffen. Diese Kompetenz wird im Rahmen der zentralen Verkehrsleitung gebündelt.¹³⁹ Personal, welches in dieser Funktion arbeitet, wird in der Regel als Verkehrsleiter oder Airline Operations Controller bezeichnet. In ihrer Position überwachen sie den gesamten Betrieb und stehen den einzelnen anderen Aufgabenfeldern als zentrale Ansprechpartner zur Verfügung.

Am Ende wird hier unter anderem entschieden, ob bei einer massigen Flugverspätung Flüge gestrichen werden müssen, Reserve Crews und Flugzeuge eingesetzt werden oder wann auf Transferpassagiere gewartet werden muss. Damit liegt der Verkehrsleitung die ultimative Entscheidungshoheit inne.¹⁴⁰ Die Verkehrsleiter müssen also die Fähigkeit besitzen, den ganzen Betrieb zu überblicken und ganzheitlich die Auswirkungen von Entscheidungen auf den Betrieb zu verstehen.¹⁴¹ Die Verkehrsleitung stellt auch sicher, dass der gesamte Betrieb nach Störungen und Abweichungen wieder schnellstmöglich im Regelmodus arbeiten kann.

2.2.2 Gestaltung der Organisationsstruktur

Die Gestaltung der Organisationsstruktur kann sich von einer Person bei sehr kleinen Fluggesellschaften bis zu einer Hundertschaft bei großen Unternehmen erstrecken.¹⁴² Gerade im Bereich der Business Aviation besteht die Verkehrszentrale in der Regel höchstens aus zwei Personen, die gleichzeitig im Dienst sind.¹⁴³ Die beiden Abbildungen 2.7 und 2.8 geben dabei einen Einblick in die Verkehrszentralen von zwei großen Fluggesellschaften.

In der Regel werden die einzelnen Bereiche innerhalb der Verkehrszentrale nach deren Funktionen, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, gruppiert. Organisatorische Strukturen, welche rein nach diesem Prinzip aufgebaut sind, repräsentieren meist sogenannte Silos.¹⁴⁴ Entsprechend den verschiedenen Typen und Größen von Fluggesellschaften haben diese ihre Organisation individuell gestaltet:

- Wer arbeitet von wo?
- Wer übernimmt welche Aufgaben?
- Wer ist wem weisungsbefugt?

¹³⁹ Vgl. KIM (2018), S. 241f.; ABDI/SHARMA (2007), S. 121; GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 322f.; CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 134.

¹⁴⁰ Vgl. HORTON/MURTHY (2000), S. 246.

¹⁴¹ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 133.

¹⁴² Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 133; ROGERS/ALLEN/HOYME (2000), S. 150; PUJET/FERON/RAKHIT (1998), S. 1800.

¹⁴³ Vgl. PAZOUREK/VÁCLAVÍK (2017), S. 48.

¹⁴⁴ Vgl. KARISCH et al. (2012), S. 288; RAPAJIC (2009), S. 61.



Abbildung 2.7: Verkehrszentrale der niederländischen KLM [Quelle: BOUARFA/BLOM/CURRAN (2016), S. 12]



Abbildung 2.8: Verkehrszentrale von American Airlines (AA) [Quelle: COOK/BILLIG (2017), S. 148]

In folgenden Abschnitten werden umfangreich diese Gestaltungsmaßnahmen für eine Verkehrszentrale aufgeführt und erläutert.

2.2.2.1 Interne Integration

Um der Entwicklung dieser Silos entgegenzuwirken, können dabei zwei Formen der Integration unterschieden werden. In der Regel werden diese Formen der Integration auch als „Integrierte Verkehrszentrale“ bezeichnet.

Im Rahmen einer physischen Integration sitzen ein Großteil oder alle der beteiligten Funktionsbereiche zusammen in einem zentralen Raum.¹⁴⁵ Dieser befindet sich oft an einem großen Hub oder dem Sitz der Fluggesellschaft.

Im eher klassischen Ansatz ordnen sich alle Funktionen der Verkehrsleitung als zentrale Koordination direkt unter. Denn in der Regel arbeitet jeder Funktionsbereich für sich, solange keine Toleranzgrenzen überschritten werden. Zum Beispiel darf die Creweinsatzsteuerung relativ frei umplanen, solange dadurch z.B. keine Verspätungen entstehen oder Flugzeuge getauscht werden müssen. Falls eine Verkehrszentrale in ihrer Organisation integriert ist, kommunizieren die einzelnen Funktionen zur Steuerung auch bilateral, treffen gemeinsam Entscheidungen und informieren am Ende lediglich die zentrale Koordination. Diese Art von Integration wird oft als Grundstein für eine effiziente Fluggesellschaft bezeichnet.¹⁴⁶ Jedoch stellen oft die Prioritäten und Ziele einzelner Funktionen großes Konfliktpotential dar, eine gemeinsame, auf Kompromissen basierende Entscheidung zu treffen.¹⁴⁷

2.2.2.2 Möglichkeiten des Outsourcings

Es ist möglich, dass bestimmte Funktionen aus Sicht der VZ ausgelagert sind. Beispielsweise kann die Beladungsplanung und -kontrolle durch einen Drittanbieter übernommen werden oder das fliegerische Personal tätigt dies mit mobilen Endgeräten und entsprechender Software selbst vor Ort.¹⁴⁸ Auch die Meteorologie-Funktion kann zum Beispiel in Deutschland durch den DWD (Deutschen Wetterdienst) erfolgen.¹⁴⁹ In den USA hingegen dürfen beispielsweise die Aufgaben eines Dispatchers nicht zu einem Drittanbieter ausgelagert werden.

¹⁴⁵ Vgl. BUCHANAN (2018), S. 116.

¹⁴⁶ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 132.

¹⁴⁷ Vgl. ROGERS/ALLEN/HOYME (2000), S. 158.

¹⁴⁸ Vgl. AVERY (2018), S. 237.

¹⁴⁹ Vgl. MAURER (2006), S. 135.

2.2.2.3 Dezentralisierung und Virtualisierung

Einzelne Funktionen wie die Wartungssteuerung, die Flughafen- bzw. Stationssteuerung oder Creweinsatzsteuerung können auch an den jeweiligen Flughäfen dezentral stationiert sein.¹⁵⁰ Dies ist besonders sinnvoll, falls eine physische Präsenz am Flughafen von Vorteil ist. Unter Umständen kann dieser Funktionsbereich trotzdem eine Kontaktperson bzw. Ansprechpartner in der Verkehrszentrale vor Ort stellen, welche dabei aber nur Informationen und Aufträge hin und herleitet.¹⁵¹

Mittels neuartiger Kommunikationstechnologien, wie beispielsweise Videochat, können einzelne dezentrale Funktion auch virtualisiert an die Verkehrszentrale angeschlossen sein.¹⁵² Dies ist sinnvoll, falls eine physische Präsenz nicht notwendig ist. Einen Mitarbeiter der Creweinsatzsteuerung beispielsweise virtuell anzubinden, würde auf Grund seiner zentralen Rolle eher Nachteile als Vorteile bieten.

2.2.2.4 Interne Spezialisierung und Cross-Qualifikation

Bei besonders großen Fluggesellschaften kann eine Funktion nochmals nach verschiedenen Kriterien aufgeteilt sein:

- Inländischen und internationalen Flügen¹⁵³
- Flugzeugtypen oder Regionen¹⁵⁴
- Hubs oder Flughäfen¹⁵⁵

Im Prinzip sind aber auch weitere individuelle Aufteilungen nach Bedürfnissen der Fluggesellschaft möglich. Es besteht auch die Möglichkeit, dass nicht nur einzelne Funktionsbereiche unterteilt sind, sondern dass eine Fluggesellschaft beispielsweise mehrere Verkehrszentralen für verschiedene Hubs betreibt.

Außerdem können einzelne Personen mehrere Aufgabenbereiche gleichzeitig übernehmen oder sind für mehrere prinzipiell geschult und einsetzbar. Das ermöglicht zum einen eine zusätzliche Flexibilität und bietet den Vorteil, dass Mitarbeiter besser die Probleme der Anderen verstehen. So können sich beispielsweise in kleineren Unternehmen das Aufgabenfeld von Verkehrsleitung und Dispatch überschneiden.¹⁵⁶

¹⁵⁰ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 133.

¹⁵¹ Vgl. ROGERS/ALLEN/HOYME (2000), S. 153.

¹⁵² Vgl. BUCHANAN (2018), S. 117.

¹⁵³ Vgl. GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 323.

¹⁵⁴ Vgl. ROGERS/ALLEN/HOYME (2000), S. 153; IRRGANG (2000), S. 183.

¹⁵⁵ Vgl. IRRGANG (2000), S. 181.

¹⁵⁶ Vgl. WIESKE-HARTZ (2000), S. 40.

2.2.2.5 Airline-Gruppen und -Konzerne

Da sich viele Airlines mittlerweile unter dem Dach eines Konzerns organisiert haben, sind dort im Rahmen von Prozess- und Strukturharmonisierungen öfter auch die Verkehrszentralen „näher“ zusammengedrückt. So betreiben Konzernfluggesellschaften regelmäßig ein gemeinsames oder aufeinander abgestimmtes Netz, so dass insbesondere regionale Fluggesellschaften unter Flugnummern der Muttergesellschaft operieren und als Zubringer an den Hubs fungieren.

Neben der Möglichkeit, dass jede Fluggesellschaft ihre eigene Verkehrszentrale betreibt, können zwei Arten von Integration unterschieden werden. Analog der Organisation aus Unterabschnitt 2.2.2.1 kann die Integration rein physisch sein, also dass beide Verkehrszentrale an einem Ort sitzen, aber von der restlichen Organisation separiert (jede Airline hat jede Funktion separat). Abbildung 2.9 zeigt exemplarisch diese Organisation für zwei Fluggesellschaften.

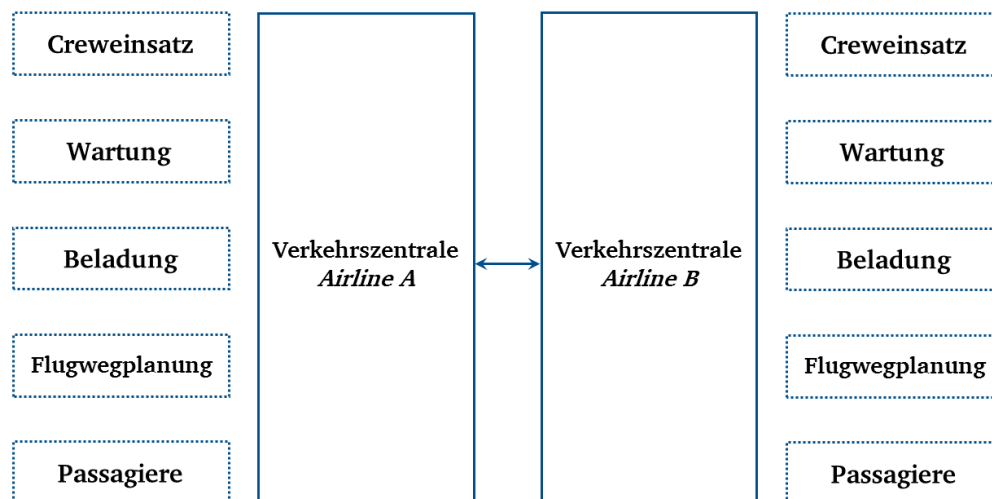


Abbildung 2.9: Separierte Verkehrszentralen in einer Gruppe von Fluggesellschaften [Quelle: CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 142, Übersetzung durch den Verfasser]

Möglicherweise gibt es trotzdem eine gemeinsame Verkehrsleitung. Alternativ sind Teile oder alle Funktionen jeder Partnergesellschaft in einer gemeinsamen Unterabteilung integriert. Abbildung 2.10 zeigt, wie Teile (z.B. Flugverfolgung und Beladungsplanung und -kontrolle) integriert sein können.

Bei der Gestaltung muss dabei auch das jeweils gültige Recht an den Sitzen der Fluggesellschaften berücksichtigt werden, da ein Luftverkehrsbetreiberzeugnis (AOC - Air Operator Certificate) unter Umständen Vorgaben zu internen Prozessen und Verantwortungsstrukturen enthält.¹⁵⁷

¹⁵⁷ Vgl. PACHON (2011), S. 10.

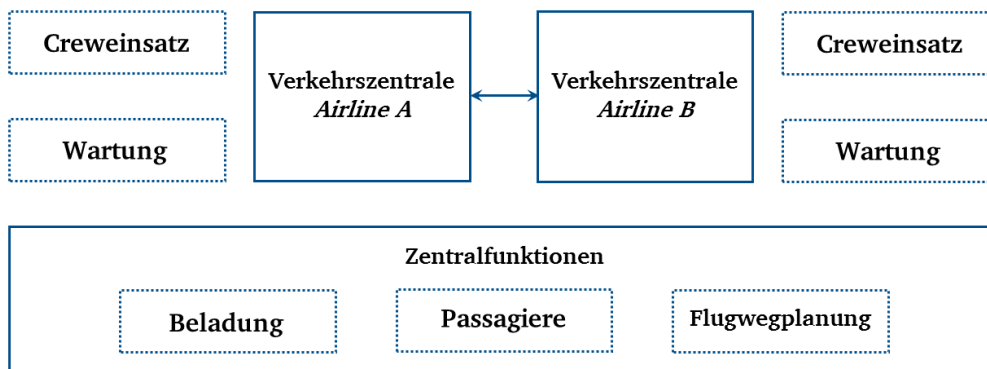


Abbildung 2.10: Partiiell integrierte Verkehrszentrale in der Gruppe von Fluggesellschaften [Quelle: CLARKE/LETOVSKÝ/SMITH (2000), S. 143, Übersetzung durch den Verfasser]

2.2.3 Entscheidungsprozesse

Da die interne Organisation der VZ durch die Fluggesellschaft flexibel gestaltet werden kann, können zur Bewältigung der Aufgaben nicht alle vier Problemdimensionen

- Flugplan (FP)
- Flugzeugeinsatz (FE)
- Creweweinsatz (CE)
- Passagierbuchungssteuerung (PS)

intern gleichzeitig in den Entscheidungsprozess einbezogen werden. Bei einer Lösungsfindung bedarf es daher eines iterativen, möglichst koordinierten Prozesses zwischen den Entscheidern.¹⁵⁸ Dazu werden entsprechende Abstimmungsrunden zwischen den entsprechenden Bereichen mit gegenseitigen Rückmeldungen gedreht, bis eine gute und gesamt gültige Lösung gefunden wurde.¹⁵⁹ Dabei steht zur Erstellung einer gültigen Lösungen der Flugplan als Schnittstelle im Fokus, dann folgen in der Regel in absteigender Priorität der Flugzeug- sowie Creweweinsatz (je nachdem welche Ressource durch die Störung oder Abweichung stärker betroffen ist) und zuletzt die Buchungen der Passagiere bzw. Fracht.¹⁶⁰ Da ohne Flugzeug und Crew kein Flug stattfinden kann, sind die Prioritäten implizit so vorgegeben. Denn Buchungen von Passagieren oder Fracht sind nicht zwingend zur Durchführung eines Fluges nötig und stellen zur

¹⁵⁸ Vgl. BOUARFA/BLOM/CURRAN (2016), S. 11.

¹⁵⁹ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 57f; LETOVSKÝ et al. (1999), S. 6.

¹⁶⁰ Vgl. BARNHART/VAZE (2016), S. 269.

Findung einer gültigen Lösung im Vergleich zu den maximalen Dienstzeiten der Crews sowie den vorgeschriebenen Wartungsintervallen keine harte Nebenbedingung dar. Da der Transport von Passagieren und Fracht aber die eigentliche Hauptaufgabe einer Fluggesellschaft ist, haben deren Anforderungen zur Findung einer guten Lösung allerdings sehr hohe Priorität.

Der beschriebene Entscheidungsprozess findet also stets in einem Spannungsfeld der verschiedenen Bereiche und konträren Ziele statt, was tendenziell schnell zur einer zeitintensiven Anzahl von Iterationen oder einer suboptimalen Gesamtlösungen führen kann.¹⁶¹ Die Intensität des Spannungsfeldes wird dabei grundsätzlich durch die möglichen Handlungsspielräume, planerischen Rahmenbedingungen und den Aufbau der VZ geprägt.

2.3 Informations- und Kommunikationssysteme

Um effektive Entscheidungen in der Verkehrszentrale treffen zu können, müssen alle relevanten Informationen in der Verkehrszentrale zusammenfließen. Gerade in Störfällen ist die unverzerrte Informationsweitergabe an die Verkehrszentrale von zentraler Bedeutung, sonst können durch ziellose Reaktionsmaßnahmen Situation teilweise kontraproduktiv behandelt werden.¹⁶² Da das System Luftverkehr hoch komplex, dynamisch und volatil ist, können Informationen unvollständig sein, sich widersprechen, zu spät oder überholt sein, wenn sie in der Verkehrszentrale eintreffen.¹⁶³ Deshalb ist eine direkte, reibungs- und vorbehaltlose Kommunikation per Telefon, Chat, Telefax, Funk, Lautsprecheranlagen, E-Mail, Austausch von Kopien und natürlich von Angesicht zu Angesicht eine Grundvoraussetzung, da die Verkehrszentrale als oberste Steuerungsinstanz nur so ihre Aufgaben erfüllen kann.

Heute sind die Informations- und Kommunikationssysteme nicht mehr wegzudenken und zwingend notwendig für eine erfolgreiche Zusammenarbeit. Nur so lassen sich unternehmensweite Ziele wie

- Standardisierung,
- Fehlervermeidung,
- Datenmengenbeherrschung,
- Kosten und
- Beherrschung der Komplexität

erreichen.¹⁶⁴ Abbildung 2.11 zeigt die Kategorisierung der eingesetzten Systeme in der VZ.

¹⁶¹ Vgl. BARNHART/VAZE (2016), S. 285; KARISCH et al. (2012), S. 288.

¹⁶² Vgl. RAPAJIC (2009), S. 10.

¹⁶³ Vgl. BRUCE (2018), S. 335; KOHL et al. (2007), S. 152.

¹⁶⁴ Vgl. VON GÖTZ (2005), S. 148.



Abbildung 2.11: IT-Systemübersicht in der Verkehrszentrale [Quelle: In Anlehnung an CLARKE/ LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 135]

Dabei spielen die verschiedenen Systeme in der Regel Teile des Informations- und Datenbestandes in das Verkehrsleitsystem ein und können dort eingesehen werden. Allerdings werden die transferierten Daten von dort aus nicht editiert oder geändert. Das Verkehrsleitsystem spielt am Ende nur die Flugplanänderungen an die verschiedenen Systeme zurück, so dass dort Lösungen für die jeweilige Funktion umgesetzt werden können. Schaut man sich den beschriebenen Entscheidungsprozess aus Abschnitt 2.2.3 an, so ist zu erkennen, dass die IT Systeme an den Schnittstellen der einzelnen Bereiche nur eingeschränkte Unterstützung leisten.

Welche konkreten Software-Produkte in den verschiedenen Bereichen der Verkehrszentrale im Einsatz sind, soll repräsentativ anhand der Produktpalette der Lufthansa Systems GmbH & Co. KG¹⁶⁵ als einer der weltweit führenden IT-Anbieter für Lösungen im operativen Management von Fluggesellschaften in den folgenden Abschnitten exemplarisch aufgezeigt werden. Neben der Lufthansa Systems gibt es noch weitere bekannte Anbieter wie

- AIMS (www.aims.aero),
- Amadeus (www.amadeus.com),
- GE Aviation (www.geaviation.com),
- IBS (www.ibsplc.com),
- INFORM (www.inform-software.de),

¹⁶⁵ www.lhsystems.com.

- Jeppesen (www.jeppesen.com),
- Sabre (www.sabreairlinesolutions.com) und
- SITA (www.sita.aero)

sowie sehr viele weitere kleine, nicht weiter bekannte Anbieter. Dabei bedienen nicht alle Anbieter jede Funktion mit ihrem Portfolio. Insbesondere große Fluggesellschaften betreiben auch eigene, auf sie zugeschnittene Softwarelösungen.

2.3.1 Verkehrsleitung

Das primäre System in der VZ ist das sogenannte Verkehrsleitsystem und wird im englischsprachigen auch als Operations Control System bezeichnet. Die von Lufthansa Systems angebotene Software trägt die Bezeichnung *NetLine/OPS ++*.¹⁶⁶ Hier laufen, wie bereits eingangs beschrieben, Daten aus allen relevanten Systemen zentral zusammen. Dabei werden die Pläne meist übersichtlich auf einem Gantt-Chart angezeigt.¹⁶⁷ Abbildung 2.12 zeigt die Eigenschaft in Form von mehrfach gefilterten Gantt-Charts in *NetLine/OPS ++*.

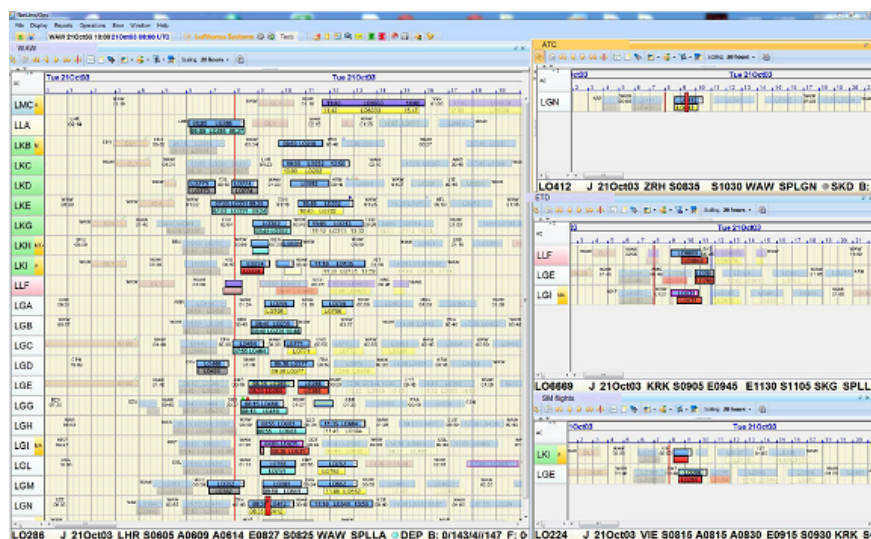


Abbildung 2.12: Multiple Gantt-Charts in *NetLine/OPS ++* [Quelle: https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2017/pb_netline_ops_2.pdf (Stand 27.01.2018)]

Zur Unterstützung der Anwender gibt es zur Einnahme verschiedener Ansichten diverse Listen und Filtermöglichkeiten, Hinweis- und Warnfunktionen zum Erkennen von Problemen sowie einen sogenannten What-If Modus zum Erstellen von Problemlösungen. So können zum Beispiel

¹⁶⁶ Vgl. https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2017/pb_netline_ops_2.pdf (Stand 27.01.2018).

¹⁶⁷ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 152; CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 135.

eingehende Transferpassagiere mit *PaxConnex* zu einem Flug in der Gantt visualisiert werden, wie Abbildung 2.13 dargestellt.

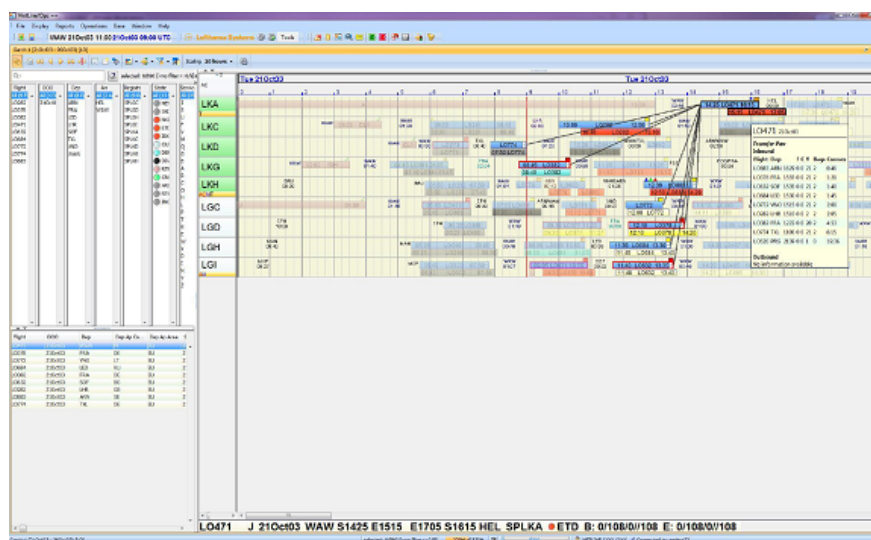


Abbildung 2.13: Übersicht der Transferpassagiere in *NetLine/Ops ++* [Quelle: https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2017/pb_netline_ops_2.pdf (Stand 27.01.2018)]

Mit *CrewConnex* lassen sich analog auch Crew Informationen visualisieren. Mit einer entsprechenden Ergänzung namens *NetLine/OPS ++ MoneyMachine* können z.B. Flugverspätungen oder Streichungen bei bereits geplanten Flügen monetär bewertet werden. Als weiteres Add-On gibt es noch eine Social Media Komponente, so dass über entsprechende Kanäle direkt mit den Passagieren kommuniziert werden kann.

2.3.2 Flugzeugeinsatz- und Wartungssteuerung

Mit der Ergänzung von *NetLine/Ops ++ MaintenanceControl* kann die Flugzeugeinsatz- und Wartungssteuerung in *NetLine/Ops ++* durchgeführt werden. Dabei bildet *NetLine/Ops ++ MaintenanceControl* die Schnittstelle zu den Planungssystemen der Wartungsgesellschaften vor Ort.

2.3.3 Dispatch und Beladungsplanung

Hierbei differenziert auch Lufthansa Systems in zwei Angebote. Zum einen gibt es *Lido/Flight 4D*, welche für die Aufgaben der Flugwegplanung bis hin zur Flugverfolgung geeignet ist.¹⁶⁸ Mit *Lido/Flight 4D* wird der Flugweg, Flughöhe, Ausweichflughäfen, Geschwindigkeit, Treibstoffverbrauch etc. unter Berücksichtigung von Wetter und Überflugsberechtigungen geplant.

¹⁶⁸ Vgl. https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2015/pb-lido-flight-and-lido-fpls_0.pdf (Stand 27.01.2018).

Dabei greift *Lido/Flight 4D* auf ihre zentrale, umfangreiche aeronautische Datenbank zurück und verfügt über eine Schnittstelle zur Verkehrskontrolle. Abbildung 2.14 zeigt den Flugwegplan in *Lido/Flight 4D* als grafische Darstellung.



Abbildung 2.14: Graphische Darstellung der Flugwegplanung mit *Lido/Flight 4D* [Quelle: https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2015/pb-lido-flight-and-lido-fpls_0.pdf (Stand 27.01.2018)]

Im Anschluss der Planung werden vor Abflug automatisch die benötigten Briefingunterlagen für die Piloten erstellt. Wie Abbildung 2.15 zeigt, kann der Flugverlauf nach Abflug mit dem Modul WINDS in Echtzeit auf einer Wetterkarte verfolgt werden.

Darüber hinaus bietet *Lido/Flight 4D* eine Schnittstelle zum zweiten Angebot namens *NetLine/Load*.¹⁶⁹ Mit *NetLine/Load* kann die Beladung eines Flugzeuges unter Berücksichtigung sämtlicher technischen und gesetzlichen Vorgaben fast automatisiert geplant werden. Abbildung 2.16 zeigt die entsprechende Sicht der Anwender auf die Beladungsplanung und -kontrolle. Im Anschluss der Berechnungen erzeugt die Software die notwendigen Dokumente automatisch und versendet diese an alle Stakeholder. Dabei ermöglicht die Vernetzung durch mobile Endgeräte den Informationsaustausch mit den Mitarbeitern vor Ort am Flugzeug in Echtzeit.

Inzwischen werden Dank entsprechender Computerleistungen auch Möglichkeiten zur dreidimensionalen Visualisierung der Position der Frachtgüter im Flugzeug unterstützt.

¹⁶⁹ Vgl. https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2018/pb_netline_load_0.pdf (Stand 29.01.2018).

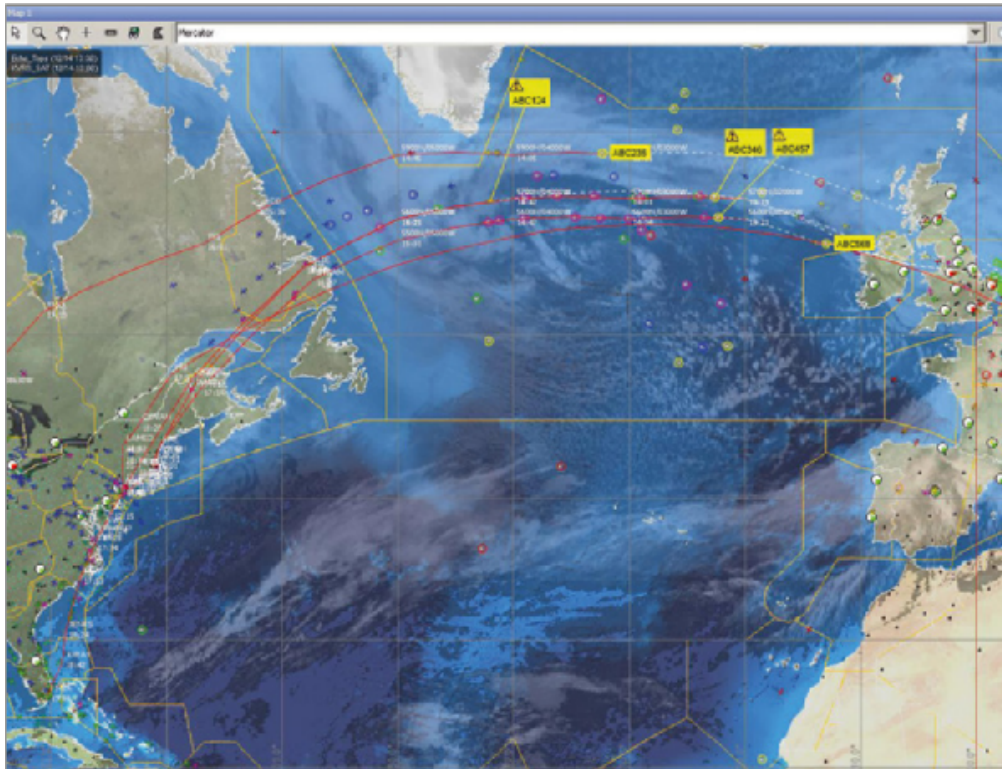


Abbildung 2.15: WINDS Modul in *Lido/Flight 4D* zur Flugverfolgung [Quelle: https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2015/pb-lido-flight-and-lido-fpls_0.pdf (Stand 27.01.2018)]

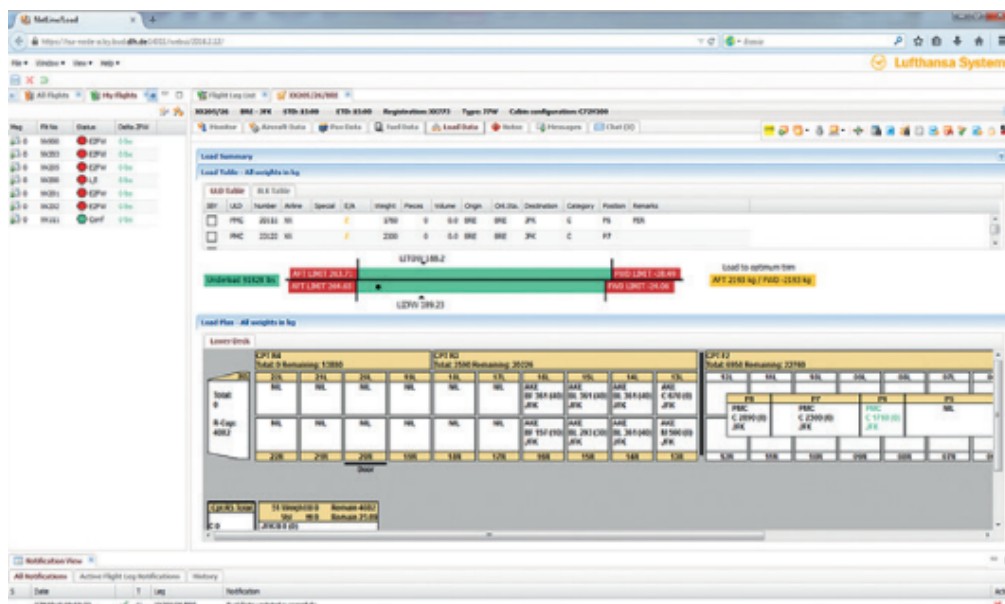


Abbildung 2.16: Visualisierung der Flugzeugbeladung durch *NetLine/Load* [Quelle: https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2018/pb-netline_load_0.pdf (Stand 29.01.2018)]

2.3.4 Creweinsatzsteuerung

Mit *NetLine/Crew* bietet Lufthansa Systems ein universelles Softwareprodukt an, mit dem sowohl die langfristige Crewbedarfsplanung als auch die operative Steuerung durchgeführt werden kann.¹⁷⁰ Für den operativen Betrieb sind dabei folgende Module von Bedeutung:

- *NetLine/Crew Pairing* - Planung und Steuerung des Creweinsatzes auf Pairing-Ebene.
- *NetLine/Crew Assignment* - Planung und Steuerung des Creweinsatzes auf Roster-Ebene.
- *NetLine/Crew Tracking* - Zentrale Funktions- und Echtzeitinformatiionskomponente zur operativen Steuerung des Creweinsatzes, bei dem Änderungen im Einsatz sofort auf Konsistenz und Legalität überprüft werden. Enthält darüber hinaus entsprechende Echtzeitkomponenten zur Verwaltung und Buchungen von Hotels.
- *NetLine/Crew Fatigue Risk Management* - Weist den Anwender bei Änderungen der Pläne gezielt auf mögliche Müdigkeitserscheinungen des fliegerischen Personals hin.
- *NetLine/Crew Profitability Evaluation Model* - Zur Evaluation von Pairing und Roster-Lösungen können sich Kostenapproximationen und weitere Performanz-Indikatoren angezeigt werden lassen.
- *NetLine/Crew CrewLink* - Dient zum direkten Austausch mit dem Personal. Diese können über eine entsprechend online zugängliche Anwendung informiert werden.

Die folgende Abbildung 2.17 verdeutlicht die Anwendung von *NetLine/Crew Tracking* im komplexen Zusammenspiel mit verschiedenen Modulen zur Steuerung der Pairings und Rosterings in einer Applikation.

2.3.5 Stationssteuerung

Aus Sicht der Fluggesellschaften ist der Turnaround des Flugzeuges der zentrale Prozess auf einem Flughafen. Deshalb benötigt die Stationssteuerung ein Tool, mit dem sie diesen überwachen und steuern kann. Dank *NetLine/Hub Turnaround Manager* kann eine nahtlose Zusammenarbeit von Fluggesellschaft, Flughafen und Dienstleistern erreicht werden.¹⁷¹ Im Gegensatz zu *NetLine/Ops ++* wird sich nicht auf die einzelnen Flüge, sondern auf die „Lücken“ zwischen den Flügen fokussiert. Abbildung 2.18 zeigt die zentrale Übersicht mit mehreren parallelen Abfertigungen an einem Flughafen.

¹⁷⁰ Vgl. https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2015/pb_netline_crew.pdf (Stand 27.01.2018).

¹⁷¹ Vgl. https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2015/pb-netline-hub_4.pdf (Stand 31.01.2018).

Insbesondere an der Schnittstelle zu den Dienstleistern kann *NetLine/Hub Turnaround Manager* sicherstellen, dass auch Vorgaben und Rahmenbedingungen zu den zugesicherten Leistungseigenschaften wie etwa Leistungsumfang, Reaktionszeit und Schnelligkeit innerhalb der vereinbarten Service-Level-Agreements (SLA) eingehalten werden.

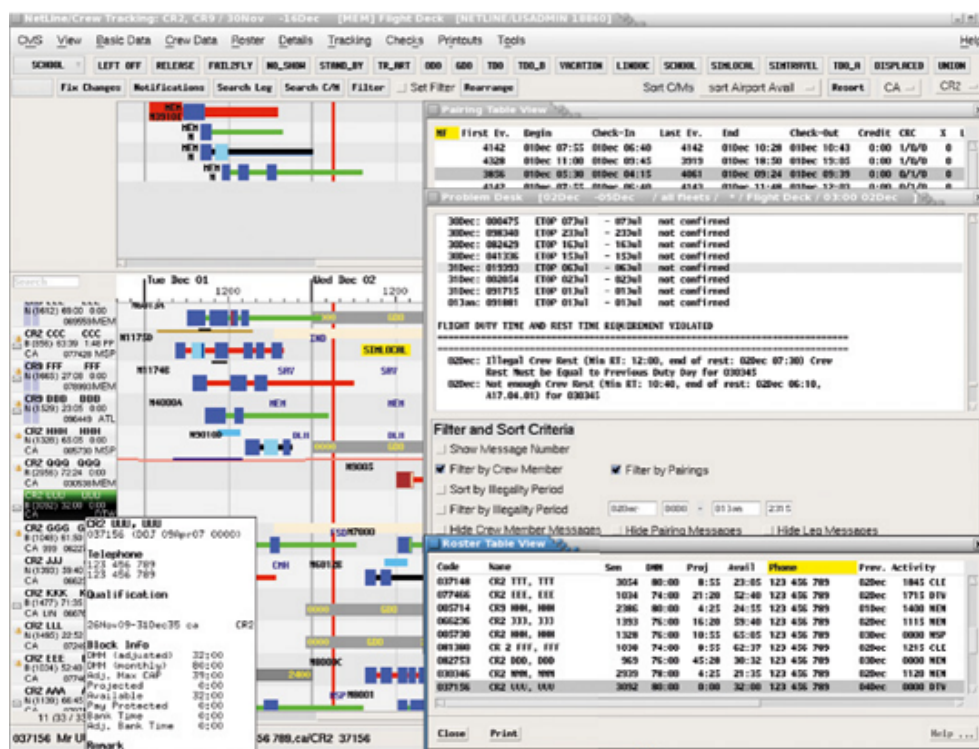


Abbildung 2.17: Verschiedene Masken in *NetLine/Crew* [Quelle: https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2015/pb_netline_crew.pdf (Stand 27.01.2018)]

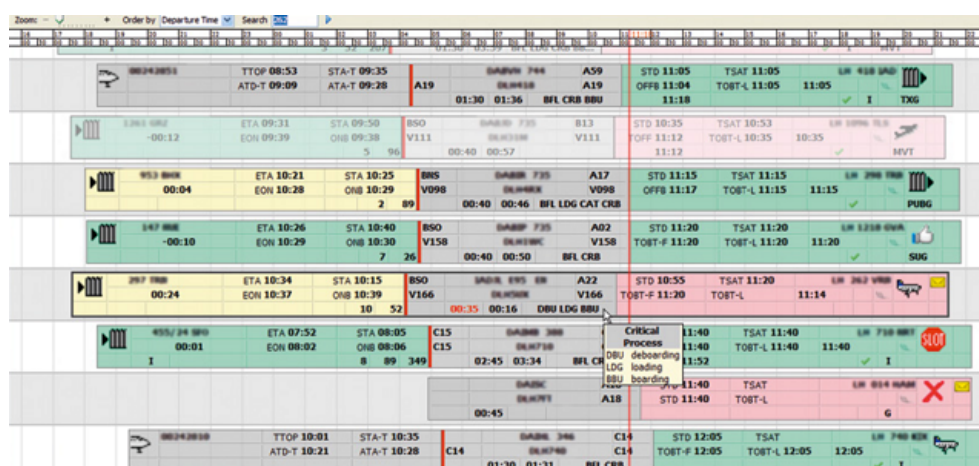
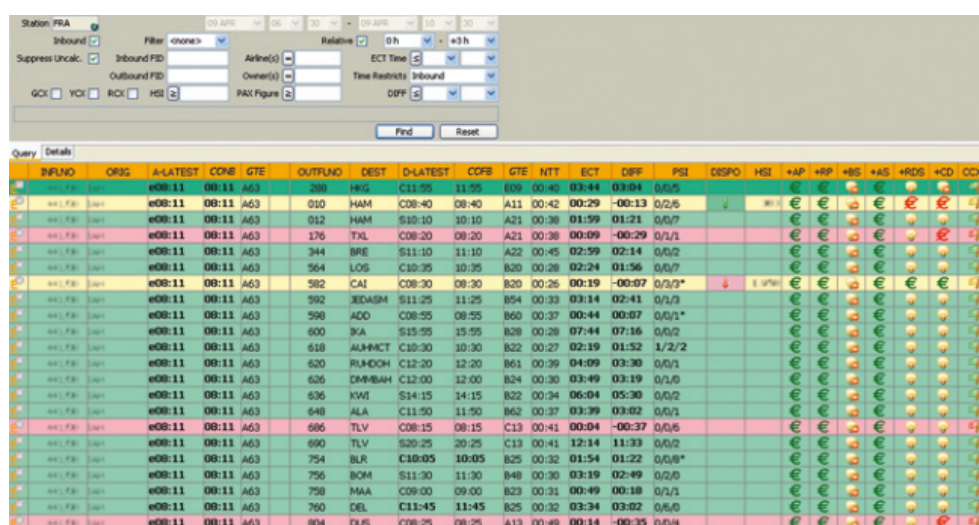


Abbildung 2.18: Mehrere Turnaround-Prozesse in *NetLine/Hub Turnaround Manager* dargestellt [Quelle: https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2015/pb-netline-hub_4.pdf (Stand 31.01.2018)]

2.3.6 Passagierbuchungssteuerung

Im Rahmen der Passagierbuchungssteuerung stehen solche Passagiere im Fokus, welche auf ihrem Reiseweg mehrere Flüge absolvieren. Mit dem angebotenen *NetLine/Connex Manager* können kritische Umsteigevorgänge zwischen den Flügen angezeigt sowie potentielle Umbuchungsoptionen bewertet werden. Abbildung 2.19 zeigt daher eine Übersicht von Umsteigeströmen an einem Flughafen in verschiedenen Farben. Bei grünen Einträgen ist der Anschluss nicht gefährdet, ein gelber Eintrag signalisiert einen kritischen Anschluss und in Rot werden verpasste Anschlüsse dargestellt. In den letzten Spalten sind entsprechende Optionen zur Umbuchung dann nach monetärer Rentabilität und Umsetzbarkeit bewertet.



| INFLIGHT | ORG | A-LATEST | CONE | GTE | OUTFLIGHT | DEST | D-LATEST | COPE | GTE | NTT | ECT | DIF | PSI | DESPO | HSI | *AP | *RP | *BS | *AS | *RDS | *CD | CDS |
|----------|-------|----------|------|--------|-----------|-------|----------|-------|-------|--------|--------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| 00:11 | 00:11 | A63 | 286 | HIG | C11:05 | 11:05 | 009 | 00:40 | 03:44 | 03:04 | 0/0/5 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 010 | HAM | C08:40 | 08:40 | A11 | 00:42 | 00:29 | -00:13 | 0/2/5 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 012 | HAM | S10:10 | 10:10 | A21 | 00:38 | 01:59 | 01:21 | 0/0/7 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 176 | TXL | C08:20 | 08:20 | A21 | 00:38 | 00:09 | -00:29 | 0/1/1 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 344 | BRE | S11:10 | 11:10 | A22 | 00:45 | 02:59 | 02:14 | 0/0/2 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 564 | LOS | C10:35 | 10:35 | B20 | 00:28 | 02:24 | 01:56 | 0/0/7 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 582 | CAI | C08:30 | 08:30 | B20 | 00:26 | 00:19 | -00:07 | 0/3/3* | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 592 | JEDASH | S11:25 | 11:25 | B54 | 00:33 | 03:14 | 02:41 | 0/1/3 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 598 | ADO | C08:55 | 08:55 | B60 | 00:37 | 00:44 | 00:07 | 0/0/1* | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 600 | 3KA | S15:55 | 15:55 | B28 | 00:28 | 07:44 | 07:16 | 0/0/2 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 618 | AUHACT | C10:30 | 10:30 | B22 | 00:27 | 02:19 | 01:52 | 1/2/2 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 620 | RUMDOH | C12:20 | 12:20 | B61 | 00:39 | 04:09 | 03:30 | 0/0/1 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 626 | DMMBAH | C12:00 | 12:00 | B24 | 00:30 | 03:49 | 03:19 | 0/1/0 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 636 | KWI | S14:15 | 14:15 | B22 | 00:34 | 06:04 | 05:30 | 0/0/2 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 648 | ALA | C11:50 | 11:50 | B62 | 00:37 | 03:39 | 03:02 | 0/0/1 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 686 | TLV | C08:15 | 08:15 | C13 | 00:41 | 00:04 | -00:37 | 0/0/6 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 690 | TLV | S20:25 | 20:25 | C13 | 00:41 | 12:14 | 11:33 | 0/0/2 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 754 | BLR | C10:05 | 10:05 | B25 | 00:32 | 01:54 | 01:22 | 0/0/6* | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 756 | BOM | S11:30 | 11:30 | B48 | 00:30 | 03:19 | 02:49 | 0/2/0 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 758 | MAA | C09:00 | 09:00 | B23 | 00:31 | 00:49 | 00:18 | 0/1/1 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 760 | DEL | C11:45 | 11:45 | B25 | 00:32 | 03:34 | 03:02 | 0/0/0 | | | | | | | | | | | |
| 00:11 | 00:11 | A63 | 804 | DUS | C08:25 | 08:25 | A13 | 00:49 | 00:14 | -00:35 | 0/0/4 | | | | | | | | | | | |

Abbildung 2.19: Übersicht von Passagierumsteigeströmen in *NetLine/Connex Manager* [Quelle: https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2015/pb-netline-hub_4.pdf (Stand 31.01.2018)]

Die notwendigen Umbuchungen bei einem verpassten Anschluss oder einem gestrichenen Flug können dann mit *NetLine/Hub Rebooking* durchgeführt werden. Über entsprechende Schnittstellen mit dem Reservierungssystem können Passagiere umgebucht und automatisch benachrichtigt werden.

2.3.7 Externe Systeme

Damit während des Fluges eine Kommunikation zwischen Piloten und Verkehrszentrale möglich ist, werden Nachrichten über das sogenannte Aircraft Communication Addressing and Reporting System (ACARS) und deren Nachfolgesysteme ausgetauscht.¹⁷² Der Austausch der Nachrichten findet dann über die Datalinks der Aeronautical Radio Inc. (ARINC) statt.

¹⁷² Vgl. KOHL et al. (2007), S. 152; MAURER (2006), S. 202.

Um sogenannte Telex-Nachrichten mit internen und externen Stakeholdern wie Flughäfen, Flugsicherungen und anderen Fluggesellschaften auszutauschen, sind die Verkehrszentralen mit der Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques (SITA) verbunden. Dabei werden die Nachrichten in der Regel im Standardformat der International Air Transport Association (IATA) verschickt.¹⁷³

2.3.8 Datawarehouse und Analytics

Auch wenn Lufthansa System derzeit kein zentrales Datawarehouse anbietet, so haben die oben beschriebenen Softwarekomponenten entsprechende Funktionalitäten implementiert wie *NetLine/Crew Reporting*, das FlightLog aus *NetLine/Ops ++* oder der *NetLine/Hub Analyzer*. Um später die Effizienz des operativen Managements auswerten zu können, sind Datawarehouses und darauf aufsetzende Analyticsanwendungen notwendig. Dank komplexer Auswertungen lassen sich kontinuierlich Schwachstellen identifizieren, um mit geeigneten Maßnahmen den operativen Betrieb kontinuierlich zu verbessern.¹⁷⁴

2.4 Zusammenfassung

Obwohl die Aufgaben für die Verkehrszentralen der verschiedenen Fluggesellschaften relativ identisch sind, können jedoch die Rahmenbedingungen des operativen Betriebes und die damit verbundenen Handlungsoptionen sehr unterschiedlich gelagert sein. Dies bedingt auch, dass die internen Strukturen und Entscheidungsprozesse sehr flexibel gestaltet sind. Dazu kommt, dass auch sehr viele unterschiedliche IT-Systeme auf Basis teilweiser disjunkter Technologien im Einsatz sind. Durch die Ausführungen des vorliegenden Kapitels konnte damit die erste gestellte Forschungsfrage geklärt werden.

Aus den bisherigen Erkenntnissen lässt sich schlussfolgern, dass sich zwar systematisch Anwendungsfälle ableiten lassen werden, jedoch eine Menge an Anforderungen berücksichtigt werden müssen, um entsprechende Entscheidungssysteme möglichst allgemeingültig zu gestalten. Gerade für das Zusammenspiel mit den verschiedenen IT-Systemen wird es nicht nur das eine System gegeben können.

¹⁷³ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 133f.

¹⁷⁴ Vgl. BUCHANAN (2018), S. 122f.

3 Entscheidungsunterstützungssysteme: Stand der Technik

Unter einem Entscheidungsunterstützungssystem wird im Kontext der vorliegenden Arbeit ein solches System verstanden, das mit einem oder mehreren eingebetteten, quantitativen Modellen im Rahmen einer Entscheidungsfindung eingesetzt wird.¹⁷⁵ Dabei zeichnet sich ein solches computerbasiertes System dadurch aus, dass es einem nicht-technischen Spezialisten durch eine graphische Oberfläche, wie etwa eine Microsoft Excel-Tabelle, einen Webbrowser oder eine andere geeignete oder vorhandene Systemoberfläche, zugänglich gemacht wird. Damit grenzen sich die Entscheidungsunterstützungssysteme von den Informations- und Kommunikationssystemen aus Abschnitt 2.3 ab, deren Fokus nicht auf einem quantitativen Modell basiert, sondern deren Hauptaufgaben das Visualisieren von Informationen, die Umsetzung und Weitergabe von Entscheidungen der Mitarbeiter ist.

Nachdem in Kapitel 2 bereits das Umfeld für den Einsatz von Entscheidungsunterstützungssystemen umfangreich beschrieben und analysiert wurde, lassen sich daraus direkt spezielle Anwendungsfälle ableiten. Im Anschluss beschäftigt sich dieses Kapitel zuerst mit dem aktuellen Entwicklungsstand solcher Systeme, bevor funktionale und nicht-funktionale Anforderungen für die Systeme und das Systemumfeld identifiziert werden, um damit schlussendlich die zweite Forschungsfrage zu beantworten.

3.1 Identifikation von Anwendungsfällen

Die für ein Entscheidungsunterstützungssystem relevanten Anwendungsfälle lassen sich prinzipiell direkt aus den Aufgaben der Verkehrszentrale, welche in Abschnitt 2.1.1 umfangreich beschrieben wurden, ableiten. Allerdings sind selbst Mitarbeiter mit vielen Jahren an Berufserfahrung auf Grund der Komplexität gelegentlich mit Situation konfrontiert, die sie bisher noch nicht meistern mussten.¹⁷⁶ Trotzdem haben oft verschiedene Ursachen die gleiche Wirkung, so dass die abgeleiteten, standardisierten Anwendungsfälle meist aus unterschiedlichen Situationen heraus angewendet werden.

Selbstverständlich ist die Relevanz einzelner Anwendungsfälle für jede Fluggesellschaft unterschiedlich, da diese beispielsweise abhängig von Typus der Fluggesellschaft (z.B. Netzwerk oder Punkt-zu-Punkt) oder dem geographischen Fokus (z.B. USA oder Europa) ist.

¹⁷⁵ Vgl. STEGLICH/FEIGE/KLAUS (2016), S. 24; POWER/SHARDA (2007), S. 1044.

¹⁷⁶ Vgl. BRUCE (2018), S. 324.

3.1.1 Störungs- und Abweichungsmanagement

Im Rahmen der Aufgaben, welche sich aus der Überwachung des operativen Betriebs nach Abschnitt 2.1 ergeben, lassen sich aus den entsprechenden Abschnitten 2.1.1.1 bis 2.1.1.9 folglich alle relevanten Anwendungsfälle für das Störungs- und Abweichungsmanagement ableiten.

Aus den Abschnitten 2.1.1.10 und 2.1.1.11 werden in der vorliegenden Arbeit keine Anwendungsfälle abgeleitet. Denn falls während des Fluges auf einen anderen Flughafen ausgewichen werden muss, so obliegt die alleinige Entscheidungshoheit bei den Piloten. Im Falle von Ereignissen von höherer Gewalt können auf Grund der Unbestimmtheit keine konkreten Anwendungsfälle abgeleitet werden können. Maßnahmen werden in beiden Fällen sehr individuell getroffen, so dass es nur schwer möglich ist, Vorschläge für Entscheidungen durch ein System generieren zu lassen.

3.1.1.1 Flugzeuge

Unabhängig vom Grund eines technischen Defekts am Flugzeug ergibt sich aus Abschnitt 2.1.1.1 prinzipiell immer das gleiche Problem, woraus der erste Anwendungsfall abgeleitet wird.

Anwendungsfall 1. *Ein oder mehrere Flugzeuge sind für jeweils definierte Zeiträume nicht einsatzfähig und können die geplanten Flüge nicht durchführen.*

Besonders herausfordernd ist dabei der Fall, dass ein Flugzeug an einem Flughafen einen AOG erleidet, an dem es nicht unmittelbar repariert werden kann, da entweder keine eigene Wartungsmöglichkeit existiert oder es keine Verträge mit dort ansässigen Dienstleistern gibt, und keine Reserve zur Verfügung steht.

3.1.1.2 Flughäfen

Die Ursachen für Kapazitätslimits können verschiedener Natur sein:

- Streik der Fluglotsen oder des Flughafenpersonals (Abschnitt 2.1.1.3)
- Überlastung der Infrastruktur (Abschnitt 2.1.1.4)
- Wetterphänomene (Abschnitt 2.1.1.5)
- Systemausfall der Luftverkehrskontrolle (Abschnitt 2.1.1.7)

Unabhängig von den genauen Gründen resultiert aus der Ursache die folgende Einschränkung:

Anwendungsfall 2. *Die Raten für ankommende und/oder abgehende Flüge werden für definierte Zeiträume an einem oder mehreren Flughäfen gesenkt, so dass die Anzahl von geplanten Flügen das entsprechende Limit übersteigt.*

Spannend ist an dieser Stelle, dass eine Ratensenkung prinzipiell für alle Flugbewegungen der verschiedenen Fluggesellschaften an einem Flughafen gelten. Gerade in solchen Fällen bedarf es Absprachen mit dem Flughafen bzw. der Flugverkehrskontrolle und dem Erfahrungsschatz der Mitarbeiter in der VZ, um für die Fluggesellschaft relevante, individuelle Raten abzuleiten.

3.1.1.3 Crews

Analog den bisher beschriebenen Ressourcenengpässen auf Flugzeug und Flughafen-Seite kann es auch zu Einschränkungen auf Seiten des Personals der Fluggesellschaft, wie in den Abschnitten 2.1.1.2 und 2.1.1.3 beschrieben, kommen.

Anwendungsfall 3. *Ein oder mehrere Mitarbeiter des fliegenden Personals fallen für definierte Zeiträume aus oder beginnen ihren Dienst verspätet.*

Besonders problematisch wird ein solcher Anwendungsfall dann, wenn die Anzahl ausfallender Crews die verfügbaren Reserven überschreitet oder sich die Ausfälle an Orten ohne entsprechende Reserve ereignen.

Ein Spezialfall des oben genannten Anwendungsfalls stellen die Streiks des fliegerischen Personals dar.

Anwendungsfall 4. *Ein oder mehrere Parteien streiken und stehen daher in einem definierten Zeitraum nur eingeschränkt oder überhaupt nicht zur Verfügung.*

Aus Sicht einer Fluggesellschaft müssen die verschiedenen Streikparteien differenziert betrachtet werden. Hat zum Beispiel das Kabinenpersonal die Arbeit niedergelegt, so können die Piloten immerhin noch leere Flugzeuge ohne Passagiere fliegen. Streiken die Fluglotsen, so bedeutet dies, dass gewisse Flughäfen nur eingeschränkt oder gar nicht angeflogen sowie Regionen nicht mehr überflogen werden können.

3.1.1.4 Flüge

Insbesondere die folgenden Faktoren tragen oft zu Verspätungen bei Flügen:

- Wetterphänomene (Abschnitt 2.1.1.5)
- Verzögerungen bei der Abfertigung (Abschnitt 2.1.1.6)
- Unsicherheiten bei den Passagiere (Abschnitt 2.1.1.8)

Gerade bei widrigem Wetter lassen sich Streichungen regelmäßig nicht vermeiden, da eine sichere Durchführung der Flüge nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Folge sind oft die in Abschnitt 2.1.1.9 beschriebenen kaskadierenden Effekte, die zeitnah wieder „eingefangen“ werden müssen.

Anwendungsfall 5. *Durch entsprechende Änderungen in den Flug- und Einsatzplänen soll eine bereits entstandene Situation von Verspätungen und Streichungen aufgelöst werden, so dass möglichst wenige Auswirkungen auf die noch geplanten Flüge entstehen.*

Speziell in den USA kann die Flugverkehrskontrolle auf Grund nicht ausreichender Landekapazitäten ein sogenanntes Verspätungsprogramm (Ground Delay Programm - GDP) an einem Flughafen verhängen, so dass eingehende Flüge an ihrem Ursprungsflughafen bereits verspätet werden.¹⁷⁷ Dabei haben die Fluggesellschaften auch die Möglichkeit, den Flug anstelle der zugewiesenen Verspätung zu streichen.¹⁷⁸ Prinzipiell können auch mehrere GDPs für verschiedene Flughäfen aktiv sein.

Anwendungsfall 6. *Flügen sollen am Ursprungsflughafen im Rahmen eines oder mehrerer Verspätungsprogramme definierte Verspätungen zugeordnet werden.*

Es sei explizit zu erwähnen, dass es sich hierbei um keinen Spezialfall von Anwendungsfall 2 handelt, da durch die Maßnahmen seitens ATC die korrigierten Raten am betroffenen Flughafen bereits eingehalten werden.

3.1.2 Optimierung der Flugzeugumläufe

Zum einen können nach der Implementierung von Lösungen zu den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Anwendungsfällen die Pläne für die nahe Zukunft nicht mehr optimal sein oder an Robustheit verloren haben. Zum anderen können sich Umweltfaktoren seit dem Planungsprozess geändert haben oder sind erst kurzfristig genauer bekannt. Daher bestehen auch im Rahmen des operativen Managements Möglichkeiten für kleinere Optimierungen. Diese Anwendungsfälle entstehen hauptsächlich an der Schnittstelle zum Planungsprozess, wie in Abschnitt 2.1.4 bereits genauer beschrieben wurde.

3.1.2.1 Gleichlauf von Crew und Flugzeug

Oft wird in der Planungsphase bereits darauf abgezielt, dass Crew- und Flugzeugumläufe möglichst „gleichlaufen“. ¹⁷⁹ Dies dient insbesondere zur Vermeidung der in Abschnitt 2.1.1.9 beschrieben kaskadierenden Effekte.

Anwendungsfall 7. *Flugzeugumläufe sollen entsprechend der vorgegebenen Creweinsatzpläne so optimiert werden, dass Crews zwischen ihren Flügen möglichst nicht das Flugzeug wechseln müssen.*

Durch entsprechende Anpassungen kann so die kurzfristige Robustheit erhöht werden.

¹⁷⁷ Vgl. BRUNNER (2014), S 238.

¹⁷⁸ Vgl. DEARMON/GOODFRIEND/MACREYNOLDS (2000), S. 225.

¹⁷⁹ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 151.

3.1.2.2 Kerosinverbrauch und -kosten

Schon alleine auf Grund des unterschiedlichen Alters sind nicht alle Flugzeuge eines Typs technisch im exakt selben Zustand. Insbesondere der Zustand und das Alter der Triebwerke haben signifikante Auswirkungen auf den Kerosinverbrauch, der sich innerhalb des gleichen Flugzeugtyps um bis zu 7.5% unterscheiden kann.¹⁸⁰ Da Kerosinpreise weltweit sehr unterschiedlich und volatil sind, verspricht eine Optimierung der Umläufe erst sehr kurzfristig entsprechendes Potential.¹⁸¹

Anwendungsfall 8. *Flugzeugumläufe sollen nach Treibstoffverbrauch der Flugzeuge und tagesaktuellen Kerosinpreisen an den Abflughäfen optimiert werden.*

Das zugrundeliegende Prinzip dieser Optimierung lautet etwa, dass effiziente Flugzeuge auf längeren Strecken oder zu Flughäfen mit teuren Kerosinpreisen eingesetzt werden sollen. Theoretisch kann dieses Potential nochmal vergrößert werden, wenn verschiedene Betankungsstrategien als Variablen mit einbezogen werden. In der Praxis erweist sich aber, dass die Betankungsstrategie relativ vielen Nebenbedingungen unterliegt und auf Grund der vielen Sicherheitsbestimmungen immer eine Entscheidung des Piloten erfordert.

3.1.2.3 Kapazitätsanpassungen

Wie in Abschnitt 2.1.4 bereits dargestellt, findet das Erlösmanagement für die Flüge bis kurz vor deren Abflug statt. Dabei lassen Fluggesellschaften ihre Flüge überbuchen, da mit einer gewissen, sogenannten No-Show-Quote gerechnet wird. Allerdings passiert es regelmäßig, dass zum Boarding doch mehr Fluggäste erscheinen als Sitzplätze im Flugzeug verfügbar sind. Um im Voraus zu vermeiden, dass Passagiere unter Zahlung von Entschädigungsleistungen am Flugsteig vor Ort auf einen anderen Flug umgebucht werden müssen, können auf Basis von Vorhersagen aus dem Buchungssystem und aktuellen Check-in Zahlen kritische Flüge bereits schon vorher einem größeren Flugzeug zugeordnet werden.

Anwendungsfall 9. *Es sollen kurzfristige Flugzeugwechsel zur Kapazitätsanpassung an veränderte bzw. tatsächlicher Nachfrage durchgeführt werden.*

Je näher der Abflug jedoch rückt, desto geringer sind tendenziell die Schwankungen durch veränderte Nachfrage. Dennoch können, wenn möglich, vorhandene Kapazitäten im Rahmen des operativen Managements noch kurzfristig verschoben werden. So kann sich auf der einen Seite die Nachfrage nicht wie erwartet entwickeln, so dass unter Umständen kleinere Flugzeuge zur Einsparung operativer Kosten eingesetzt werden.

¹⁸⁰ Vgl. LAPP/WIKENHAUSER (2012), S. 27.

¹⁸¹ Vgl. KARLBERG (2013), S. 10.

Auf der anderen Seite können bei Störungen anderer Fluggesellschaft größere Flugzeuge auf den Flügen von und zu deren Hubs eingesetzt werden, um durch zusätzliche Passagiere weitere Erlöse zu erzielen. Im Grunde setzt dieser Anwendungsfall auf dem Konzept der dynamischen Planung auf, welches bereits in Abschnitt 2.1.4.3 erläutert wurde.

3.1.2.4 Infrastruktur am Flughafen

In den USA sind oft ganze Terminals nach inländischen und internationalen Flügen unterteilt. In Europa beispielsweise sind innerhalb teilnehmender Länder im Rahmen des Schengen-Abkommens keine Grenzkontrollen notwendig.¹⁸² Daher sind an vielen Flughäfen die Gates und Terminals in spezielle Bereiche entsprechend der Anforderungen an die Sicherheits- und Grenzkontrollen unterteilt.

Dieser Sachverhalt führt bei den Fluggesellschaften am Frankfurter Flughafen zwangsläufig zur Herausforderung, dass ein Flugzeug am Frankfurter Flughafen kommend aus London an ein Nicht-Schengen Flugsteig mit Zugang zur Grenzkontrolle muss. Wenn dieses Flugzeug weiter nach Berlin fliegen sollte, muss es auf Grund der nicht benötigten Passkontrolle an einem Schengen-Flugsteig starten. Da in Frankfurt im Gegensatz zu München nicht alle Flugsteige an verschiedene Gebäudeebenen mit entsprechenden Sicherheitsbereichen angeschlossen sind, muss entweder das Flugzeug unter zusätzlich Zeit- und Ressourcenaufwand umgeschleppt oder gleich auf einer Vorfeldposition abgefertigt werden, da beim Transfer der Fluggäste mit dem Bus zwei unterschiedliche Gates an verschiedenen Terminals bedient werden können. Um solche Situation möglichst zu vermeiden, sollten Flüge entsprechend verknüpft werden.

Anwendungsfall 10. *Flugzeugumläufe sollen zur optimalen Ausnutzung der Flughafeninfrastruktur angepasst werden.*

Darüber hinaus lassen sich auch gerade an Hubs Flüge so kombinieren, dass an- und abkommende Flüge mit vielen Transferpassagieren an zentrale Flugsteige gelegt werden können, um möglichst kurze Umsteigewege und -zeiten im Sinne eines reibungslosen Betriebes zu garantieren.

3.2 Entwicklungsstand in Theorie und Praxis

Um den Entwicklungsstand systematisch zu untersuchen, werden zuerst die Beiträge aus Wissenschaft und Praxis gesammelt und nach verschiedenen Kriterien genauer verglichen. Im Anschluss werden die Erkenntnisse über die Reife der präsentierten Entscheidungsunterstützungssysteme geliefert. Zuletzt werden die Eigenschaften kommerziell verfügbarer Produkte kurz dargestellt.

¹⁸² Vgl. WIESKE-HARTZ (2000), S. 75.

3.2.1 Wissenschaftliche Literatur

Zur Identifikation der relevanten Literatur bietet sich an, auf früheren Forschungsbeiträgen mit bereits existierenden Übersichten aufzubauen.¹⁸³ Dafür kommen die folgenden drei Beiträge in Frage:

- Quelle A: CLAUSEN et al. (2010)
- Quelle B: VISENTINI et al. (2014)
- Quelle C: CASTRO/ROCHA/OLIVEIRA (2014)

Dazu sind in einem ersten Schritt alle bisherigen Beiträge, welche in den Quellen A, B und C aufgelisteten wurden, überwiegend in den folgenden Portalen recherchiert worden:

- EBSCOhost (<https://search.ebscohost.com>)
- Google Scholar (<https://scholar.google.com>)
- IEEE Xplore Digital Library (<https://ieeexplore.ieee.org>)
- JSTOR (<https://www.jstor.org>)
- ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com>)
- Springer Link (<https://link.springer.com>)
- Suchportal der ULB Darmstadt (<https://hds.hebis.de/ulbda>)

Im Rahmen einer Schneeballsuche sind dann neuere Beiträge identifiziert worden, welche die bestehenden Referenzen aus den Übersichtsquellen zitieren und wenigstens ein Modell bzw. Algorithmus für ein Entscheidungsunterstützungssystem entwickeln. Zum einen unterstützen einige Portale bereits die direkte Anzeige aller neuen Beiträge, welche einen gesuchten Beitrag referenzieren, zum anderen wurden Teile der Titel der bereits bestehenden Beiträge erneut eingegeben und nach Beiträgen gesucht, die die genannten Eigenschaften erfüllen.

Wie eingangs bereits beschrieben, fokussiert sich die überwiegende Mehrheit der Arbeiten auf die Entwicklung von Modellen und Algorithmen. Die Modelle und Algorithmen werden später in Kapitel 4 noch genauer diskutiert. In den nächsten Abschnitten wird die Literatur bezüglich der Funktionen und Anwendungsfälle klassifiziert und die Erkenntnisse bisheriger Anwendbarkeit reflektiert.

¹⁸³ Vgl. CASTRO/ROCHA/OLIVEIRA (2014), S. 53-61; VISENTINI et al. (2014); CLAUSEN et al. (2010), S. 814,818.

3.2.1.1 Klassifizierung

Zur Klassifizierung existierender Forschungsbeiträge wird die vorliegende Arbeit die bestehenden Forschungsarbeiten nach verschiedenen Kriterien einordnen.

Einbezogene Problemdimensionen

Entsprechend des in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Prozesses können die verschiedenen Problemdimensionen in die Berechnung mit einbezogen werden:

- Flugplan (FP)
- Flugzeugeinsatz (FE)
- Creweinsatz (CE)
- Passagierbuchungssteuerung (PS)

Da in allen Forschungsbeiträgen immer die Dimension des Flugplans mit einbezogen ist, wird sie nicht weiter explizit aufgelistet.

Eine Problemdimension zählt als vollständig einbezogen, falls entsprechende Anpassungen für die jeweilige Dimension vorgenommen werden dürfen. In der Arbeit von BRATU/BARNHART (2006) wird beispielsweise versucht, dass Crew Pairings durch Änderungen im Flugplan valide bleiben, es werden allerdings keine Wiederherstellungsoptionen berechnet, falls ein Crew Pairing unzulässig wird.¹⁸⁴ Damit zählt in diesem Falle die Problemdimension als nicht mit einbezogen.

Integrationsgrad der Lösungsmethodik

Wenn mindestens zwei der Problemdimensionen einbezogen sind, kann auch bezüglich der Berechnungslogik differenziert werden:

- Sequentiell (SE): Es wird eine Sequenz von Teilproblemen gelöst, wobei die Lösung aus einem vorherigen Teilproblem als fixe Vorgabe für das nächste Teilproblem dient. Beispielsweise werden für Flugplanänderungen und Flugzeugeinsatz eine gemeinsame Lösung errechnet, die dann als fixe Vorgabe zur Lösung des Creweinsatzproblems dient.
- Iterativ (IT): Ähnlich wie sequentiell, allerdings darf ein Teilproblem ein entsprechendes Feedback in Form von Zulässigkeit- oder Kosteninformation an sein Vorgängerproblem weitergeben, so dass dieses erneut gerechnet werden kann.
- Integriert (IN): Es wird eine globale Lösung für alle Dimensionen ohne Betrachtung von einzelnen Teilproblemen und entsprechenden iterativen Zwischenschritten gefunden.

¹⁸⁴ Vgl. BRATU/BARNHART (2006), S. 286.

Entwicklungsstand

Der Entwicklungsstand eines Beitrages beschreibt, wie weit ein entsprechender Ansatz zur Lösung entwickelt wurde.

- Modell und Algorithmus (MA): Es ist lediglich ein Modell sowie Algorithmus beschrieben, der höchstens auf ein paar exemplarischen Datensätzen demonstrativ angewendet wurde.
- Entscheidungsunterstützungssystem (EUS): Es ist neben einem Model und Algorithmus auch mindestens eine prototypische Anwendung in Zusammenarbeit mit einer Fluggesellschaft entstanden.

Anwendungsfall

Eine Forschungsarbeit wird in der Regel von einem oder mehreren der in Abschnitt 3.1 eingeführten Anwendungsfälle motiviert und auf einem oder mehreren Datensätzen experimentell untersucht.

Den einzelnen Forschungsbeiträgen zugrunde liegenden Modelle und Algorithmen müssen später noch in Kapitel 4 ausführlich klassifiziert und verglichen werden, da ein Vergleich in einer tabellarischen Übersicht auf Grund der Heterogenität nicht möglich ist.

3.2.1.2 Übersicht

Die nachfolgende Literaturübersicht¹⁸⁵ ist in insgesamt drei Tabellen chronologisch für die Jahre früher als 1998, 1999–2009 sowie 2010–2017 gegliedert. Dabei ist bei gleichem Erscheinungsjahr alphabetisch nach dem Nachnamen des ersten Autors sortiert. Die tabellarische Übersicht der Literatur entspricht dem Stand der letzten Recherche vom 19. November 2017.

¹⁸⁵ Drei der in den Quellen A und/oder C genannten Beiträge aus den Jahren 1994, 2001 und 2009 konnten nicht in der Übersicht aufgenommen werden, da sie weder in einem der für die vorliegende Arbeit verwendeten Suchportalen noch über die universitären Publikationsplattformen oder den referenzierten Veranstaltungsseiten verfügbar waren. Dabei handelt es sich um den Beitrag „Final report to Northwest Airlines on the crew recovery problem“ von JOHNSON/LETOVSKY/NEMHAUSER/PANDIT/QUERIDO aus dem Jahre 1994 vom Georgia Institute of Technology, Atlanta, den Vortrag „Rescheduling Flights, Aircraft, and Passenger Simultaneously under Disrupted Operations – A Mathematical Programming Approach based on Statistical Analysis“ von ACUNA-AGOST/FEILLET/MICHELON/GUEYE aus 2009 im Rahmen einer AGIFORS Konferenz sowie die Dissertation „The flight perturbation problem - operational aircraft rescheduling“ von ANDERSON aus 2001 an der Linköping Universität, Schweden.

| Beitrag | Quelle | FE | CE | PS | Int.-Grad | Reife | Anw.-Fall |
|--|--------|----|----|----|-----------|-------|-----------|
| TEODOROVIĆ/GUBERINIĆ (1984) | A,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| TEODOROVIĆ/STOJKOVIĆ (1990) | A,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| JARRAH et al. (1993) | A,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| TEODOROVIĆ/STOJKOVIĆ (1995) | A,C | x | x | - | SE | MA | 1, 3, 5 |
| MATHAISEL (1996) | A,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| RAKSHIT/KRISHNAMURTHY/YU (1996) | A,C | x | - | - | - | EUS | 1 |
| TALLURI (1996) | A,C | x | - | - | - | EUS | 9 |
| YAN/YANG (1996) | A,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| YAN/YOUNG (1996) | A | x | - | - | - | MA | 5 |
| ARGÜELLO/BARD/YU (1997) ¹⁸⁶ | A,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| CAO/KANAFANI (1997a) & (1997b) | A,C | x | - | - | - | MA | 5 |
| LETOVSKY (1997) | A,C | x | x | x | IT | MA | 5 |
| LUO/YU (1997) ¹⁸⁷ | A,C | x | - | - | - | MA | 6 |
| WEI/YU/SONG (1997) | A,C | - | x | - | - | MA | 5 |
| YAN/LIN (1997) | A | x | - | - | - | MA | 2 |
| YAN/TU (1997) | A,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| CLARKE (1998a) ¹⁸⁸ | A,C | x | x | x | IT | MA | 2 |
| STOJKOVIĆ/SOUMIS/DESROSIERS (1998) | A,C | - | x | - | - | MA | 3, 5 |

Tabelle 3.1: Forschungsbeiträge für Entscheidungsunterstützung in der VZ älter als 1999

¹⁸⁶ Modell identisch mit ARGÜELLO/BARD/YU (2002).

¹⁸⁷ Modell identisch mit LUO/YU (2002).

¹⁸⁸ Es wird auf die Dissertation des Autors im gleichen Jahr verwiesen, da in den Quellen auf zwei nicht veröffentlichte Arbeitspapiere referenziert wird.

| Beitrag | Quelle | FE | CE | PS | Int.-Grad | Reife | Anw.-Fall |
|--------------------------------------|--------|----|----|----|-----------|-------|-----------|
| LETOVSKÝ/JOHNSON/NEMHAUSER (2000) | A,C | - | x | - | - | MA | 5 |
| THENGVAL/BARD/YU (2000) | A,B,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| BARD/YU/ARGÜELLO (2001) | A,B,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| STOJKOVIĆ/SOUMIS (2001) | A,C | - | x | - | - | MA | 5 |
| THENGVAL/YU/BARD (2001) | A,B,C | x | - | - | - | MA | 2 |
| LØVE et al. (2002) ¹⁸⁹ | A,B,C | x | - | - | - | MA | 5 |
| ROSENBERGER/JOHNSON/NEMHAUSER (2003) | A,B,C | x | - | - | - | MA | 1, 2 |
| THENGVAL/BARD/YU (2003) | A,B,C | x | - | - | - | MA | 2 |
| YU et al. (2003) | A,C | - | x | - | - | EUS | 5 |
| ABDELGHANY ET AL. (2004a) | A,C | - | x | - | - | MA | 5 |
| ANDERSSON/VÄRBRAND (2004) | A,C | x | - | - | - | MA | 1, 5 |
| GUO (2005) ¹⁹⁰ | A,C | - | x | - | - | MA | 3 |
| STOJKOVIĆ/SOUMIS (2005) | A,C | - | x | - | - | MA | 5 |
| ANDERSSON (2006) | A,C | x | - | - | - | MA | 1, 5 |
| BRATU/BARNHART (2006) | A,B,C | x | - | x | IN | MA | 5 |
| LIU et al. (2006) | A,C | x | - | - | - | MA | 2 |
| NISSEN/HAASE (2006) | A,C | - | x | - | - | MA | 5 |
| CASTRO/OLIVEIRA (2007) | A,C | - | x | - | - | MA | 3 |
| EGGENBERG/SALANI/BIERLAIRE (2007) | A,C | x | - | - | - | MA | 1, 2 |
| GAO (2007) | A,C | x | x | - | IT | MA | - |
| KOHL et al. (2007) | C | x | x | x | IT | EUS | 1, 5 |
| MEDARD/SAWHNEY (2007) | A,C | - | x | - | - | MA | 5 |
| YANG (2007) | C | x | - | - | - | MA | 2 |
| ZHAO/ZHU (2007) | A,C | x | - | - | - | MA | 1 |
| ZHAO/ZHU/MEI (2007) | A,C | - | x | - | - | MA | 1 |
| ABDELGHANY/ABDELGHANY/EKOLLU (2008) | A,B,C | x | x | - | IT | MA | 6 |
| LIU/JENG/CHANG (2008) | A,B,C | x | - | - | - | MA | 2 |
| ZHANG/HANSEN (2008) | A,C | x | - | x | IN | MA | 2 |
| GAO/TANG/ZHU (2009) | | x | - | - | - | MA | 1, 2 |

Tabelle 3.2: Forschungsbeiträge für Entscheidungsunterstützung in der VZ zwischen 1999 und 2009

¹⁸⁹ Modell identisch mit LØVE et al. (2005).

¹⁹⁰ Da kein Zugriff auf die in den Quellen referenzierte Veröffentlichung aus 2004 möglich war, wird auf die Dissertation des Autors sowie den Beitrag von GUO/SUHL/THIEL (2005) ein Jahr später verwiesen.

| Beitrag | Quelle | FE | CE | PS | Int.-Grad | Reife | Anw.-Fall |
|---------------------------------------|--------|----|----|----|-----------|-------|-----------|
| BABIĆ et al. (2010) | | x | - | - | - | EUS | 1 |
| CHEN/CHEN/ZHANG (2010) ¹⁹¹ | | - | x | - | - | MA | 5 |
| EGGENBERG/SALANI/BIERLAIRE (2010) | C | x | - | x | SE | MA | 1, 2, 5 |
| JAFARI/ZEGORDI (2010) | C | x | - | x | IN | MA | 1, 2 |
| LIU/CHEN/CHOU (2010) | | x | - | - | - | MA | 2 |
| PETERSEN ET AL. (2010) ¹⁹² | B,C | x | x | x | IT | MA | 2 |
| ZEGORDI/JAFARI (2010) | C | x | - | x | IN | MA | 1, 5 |
| AGUIAR/TORRES/CASTRO (2011) | | x | x | - | - | MA | 5 |
| BISAILLON et al. (2011) | C | x | - | x | IT | MA | 1, 2, 5 |
| CASTRO/OLIVEIRA (2011) | C | x | x | x | IT | MA | 3 |
| JAFARI/ZEGORDI (2011) | | x | - | x | IN | MA | 1, 5 |
| LE/SUN (2011) | | - | x | - | - | MA | 1, 2, 5 |
| CHANG (2012) | | - | x | - | - | MA | 5 |
| RAFIEI/MANZARI/KHASHEI (2012) | | x | - | - | - | MA | 1, 5 |
| WU/LE (2012) | C | x | - | - | - | MA | 1, 2 |
| ZHAO/GUO (2012) | C | x | - | - | - | MA | 5 |
| FLUCK/BRAND/DORNDORF (2013) | | x | - | - | - | MA | 2 |
| LE/WU (2013) | | x | x | - | IN | MA | 1, 3 |
| LEI et al. (2013) | | x | - | - | - | MA | 1 |
| CASTRO/ROCHA/OLIVEIRA (2014) | C | x | x | x | IT | MA | 5 |
| SINCLAIR/CORDEAU/LAPORTE (2014) | | x | - | x | IT | MA | 1, 2, 5 |
| ZHANG/LAU (2014) | | x | x | - | IN | MA | 1, 6 |
| HU et al. (2015) | | x | - | x | IN | MA | 1 |
| MAHER (2015a) & (2015b) | | x | x | x | IN | MA | 2 |
| NICKKAR et al. (2015) | | x | x | - | IN | MA | 1, 5 |
| VOS/SANTOS/OMONDI (2015) | | x | - | - | - | EUS | 1 |
| ZHANG/LAU/YU (2015) | | x | x | - | SE | MA | 5 |
| ARIKAN/GÜREL/AKTÜRK (2016) | | x | - | x | IN | MA | 5, 8 |
| HU et al. (2016) | | x | - | x | IN | MA | 1 |
| SINCLAIR/CORDEAU/LAPORTE (2016) | | x | - | x | IN | MA | 1, 2, 5 |
| ZHANG et al. (2016) | | x | - | x | IT | MA | 1, 2, 5 |
| CHEN/CHOU (2017) | | - | x | - | - | MA | 3 |
| HU et al. (2017) | | x | - | - | - | MA | 1 |
| MARLA/VAABEN/BARNHART (2017) | | x | - | x | IN | MA | 5, 8 |
| WU et al. (2017) | | x | - | - | - | MA | 1 |

Tabelle 3.3: Forschungsbeiträge für Entscheidungsunterstützung in der VZ seit 2010

¹⁹¹ Modell identisch mit ZHANG/ZHANG (2010).

¹⁹² Verbesserungen des Algorithmus in PETERSEN et al. (2011). Konsolidierte Ergebnisse in PETERSEN et al. (2012).

3.2.1.3 Fazit

Betrachtet man Abbildung 3.1, so gibt es einen kontinuierlichen, positiven Trend in der Anzahl der Forschungsarbeiten, geprägt von einzelnen Spitzen in den Jahren 1997, 2007 und 2010.

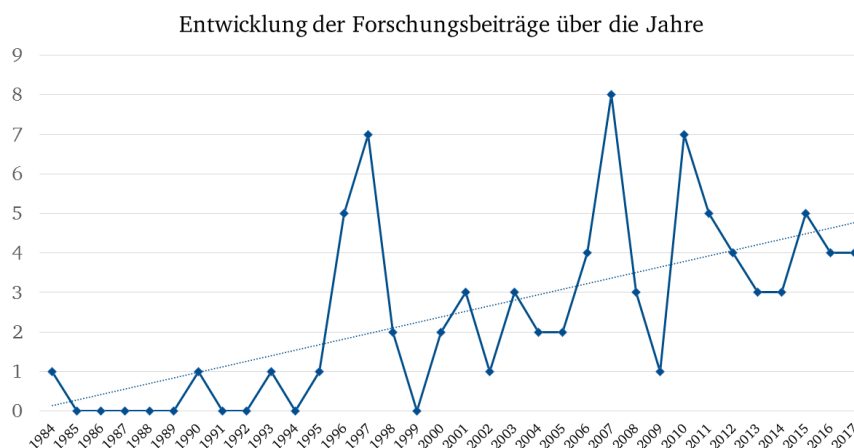


Abbildung 3.1: Entwicklung der Anzahl von Forschungsbeiträgen zur Entscheidungsunterstützung in der Verkehrszentrale im Zeitraum 1984 bis 2017

Auch ist zu erkennen, dass sich seit der Arbeit von BRATU/BARNHART aus 2006 der Fokus immer weiter zur Integration der Passagierbuchungssteuerung verschoben hat, dessen Dimension über viele Jahre in der Literatur prinzipiell vernachlässigt wurde.¹⁹³ Dieser Trend führte vermutlich zur zweiten Spitze der Beiträge im Jahr 2007. Werden trotzdem alle Beiträge gesamtheitlich betrachtet, so adressieren etwa 65% nur jeweils eine Problemdimension. Insgesamt adressieren dabei mit über 80% der Arbeiten den Flugzeugeinsatz, Lösungen für die Passagierbuchungssteuerung werden nur in etwa 25% der Beiträge thematisiert.

Dazu kommt, dass 70% der Beiträge ihre Methodik mit Daten evaluieren, welche nur auf einem Anwendungsfall basieren, vornehmlich Anwendungsfall 1 mit etwa 50% und Anwendungsfall 5 mit etwa 45%. Immerhin nutzen vermehrt einige Beiträge zur Auswertung ihres Modells die Fallbeispiele der Société française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision (ROADEF), welche echte, anonymisierte Daten einer Fluggesellschaft im Rahmen des veranstalteten Wettbewerbes zum Thema Disruption Management for Commercial Airlines im Jahre 2009 mit wenigstens drei verschiedenen Anwendungsfällen zur freien Verfügung gestellt haben.¹⁹⁴ Im Nachgang dieses Wettbewerbes kam es dann zu einer größeren Anzahl an Beiträgen im Jahr 2010. Trotz des positiven Trends gibt es nur 6 von den insgesamt 82 Beiträgen, deren entwickeltes Modell mindestens im Rahmen einer prototypischen Anwendung in der Verkehrszentrale evaluiert oder

¹⁹³ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 154.

¹⁹⁴ Zu den Fallbeispielen der ROADEF siehe <http://www.roadef.org/challenge/2009/en/> (Stand: 16.02.2018). Zu den Beiträgen vgl. ZHANG et al. (2016), S. 229; SINCLAIR/CORDEAU/LAPORTE (2016), S. 49; SINCLAIR/CORDEAU/LAPORTE (2014), S. 241; BISAILLON et al. (2011), S. 151.

diskutiert wurde. Da um 1995/1996 die ersten Systeme in der Praxis eingeführt wurden, erklärt sich damit die folgende Spitze um 1996/1997 der veröffentlichten Beiträge.

Auffallend ist auch, dass die in der Übersicht aus Abschnitt 3.2.1.2 aufgeführte Literatur sehr selten in den Referenzen für Kapitel 2 erwähnt wird. Dies belegt, dass sich kaum ein Beitrag umfangreich mit der Organisation und Aufgabe einer VZ auseinandersetzt.

3.2.2 Prototypische und eingesetzte Lösungen

Entsprechend der tabellarischen Übersicht aus Abschnitt 3.2.1.2 werden im Folgenden die Beiträge mit dem Reifegrad eines Entscheidungsunterstützungssystems genauer beleuchtet.

Software-Architektur (SWA)

Da heute eine Fluggesellschaft mit entsprechenden Informations- und Kommunikationssystemen arbeitet, müssen die Tools an diese Systeme technisch angebunden werden. Dabei untersuchen einige Beiträge auch diese technische Anbindung und stellen die zugrundeliegende Software-Architektur im Rahmen der Forschung vor.

Entwicklungsstand

Beim Entwicklungsstand kann unterschieden werden, ob sich ein System bereits in der Anwendung (A) befindet, lediglich implementiert (I) ist oder dies gerade passiert und noch keine Erkenntnisse über die produktive Anwendung vorliegt.

Einsparpotential

Gerade bei den bereits in der Anwendung befindlichen Systemen ist es von großer Bedeutung, wie viel Einsparungen durch Anwendung in Erwartung und/oder nachweislich erzielt wurden.

| Beitrag | Fluggesellschaft | SWA | Stand | Einsparpotential |
|-------------------------------------|---------------------|-----|-------|----------------------|
| RAKSHIT/KRISHNAMURTHY/ YU (1996) | United Airlines | - | A | 40 Mio. \$ / Jahr |
| TALLURI (1996) | US Airways | - | I | - |
| YU et al. (2003) | Continental Airways | x | A | 20-40 Mio. \$ / Jahr |
| KOHL et al. (2007) ¹⁹⁵ | British Airways | x | I | - |
| BABIĆ et al. (2010) | JAT Airways | - | I | - |
| VOS/SANTOS/OMONDI (2015) | Kenya Airways | - | I | |

Tabelle 3.4: Übersicht der Prototypen oder eingesetzten Entscheidungsunterstützungssysteme in der VZ auf Basis der analysierten Literatur.

¹⁹⁵ Die Arbeit wurde im Rahmen des EU-geförderten Forschungsprojektes „Decision support for integrated aircraft and crew recovery on the day of operations (DESCARTES)“ mit den Projektpartnern British Airways, Technische Universität Dänemark und Carmen Systems (heute Jeppesen) angefertigt. Weitere Informationen unter <https://trimis.ec.europa.eu/project/decision-support-integrated-aircraft-and-crew-recovery-day-operations> (Stand 11.02.2018) verfügbar.

Dabei weicht die hier vorliegende Einschätzung, welcher Beitrag als EUS zu klassifizieren ist, teilweise deutlich von denen der Autoren CASTRO/ROCHA/OLIVEIRA ab. Im Zeitraum bis 2012 werden elf Beiträge als EUS bewertet, während die vorliegende Arbeit nur sechs davon mit dem entsprechenden Reifegrad bewertet.¹⁹⁶ Die Abweichung lässt sich damit begründen, dass die in Kapitel 2 aufgearbeiteten Inhalte eine deutlich differenzierte Betrachtung zulassen.

Aus der Übersicht wird trotzdem deutlich, dass selbst die wenigen Systeme mit dem Reifegrad eines Entscheidungsunterstützungssystems nur eingeschränkt in der Praxis eingesetzt werden. Ein Grund dafür ist sicherlich, dass sich ein Misserfolg eines solchen Systems im operativen Betrieb im Gegensatz zur längerfristigen Planung schon nach kürzester Zeit zeigt.¹⁹⁷ Besonders hervorzuheben ist deshalb der Beitrag von YU et al. (2003) für seinen dauerhaft erfolgreichen Einsatz, da er zum einen den höchsten Reifegrad aller Systeme besitzt und zum anderen den Autoren auch der Franz Edelman Award¹⁹⁸ für diese besondere Leistung verliehen wurde.¹⁹⁹

Auch auf der jährlichen Konferenz der AGIFORS-Arbeitsgruppe Airline Operations wurde in den letzten 5 Jahren nur eine Präsentation von Southwest Airline in 2016 vorgestellt, welche über die erfolgreiche Einführung eines Systems zur Unterstützung der zentralen Koordination berichten.²⁰⁰ Außerdem konnte in Gesprächen mit Experten auf dem Gebiet herausgefunden werden, dass mit dem Ausscheiden einzelner Personen aus dem universitären Umfeld die in Kooperation entwickelten Modelle und Algorithmen nicht mehr für den Praxiseinsatz weiterentwickelt werden konnten.

3.2.3 Kommerzielle Produkte

Im Rahmen der jährlichen Konferenz der AGIFORS-Arbeitsgruppe Airline Operations stellen auch die kommerziellen Anbieter ihre in Abschnitt 2.3 beschriebenen Softwareangebote und deren Entscheidungsunterstützungssysteme vor. In persönlichen Gesprächen mit den Produktmanagern der einzelnen Provider in den Jahren 2013-2016 im Rahmen der jährlichen Konferenz konnte bestätigt werden, dass weltweit nur etwa 10-15 Fluggesellschaften die kommerziell verfügbaren Entscheidungsunterstützungssysteme eingeführt haben. Über die Erfahrungen in der Anwendung konnten jedoch keine Erkenntnisse aus den persönlichen Gesprächen gewonnen werden. Im folgenden Abschnitt sollen repräsentativ drei Produkte vorgestellt werden, welche die Anbieter an Entscheidungsunterstützungssystemen in ihrem offiziellen Portfolio führen. Über einige weitere Produkte, wie etwa das Disruption Management Produkt von Jepessen, ließen sich über die offizielle Website keine weiteren Informationen finden.

¹⁹⁶ Vgl. CASTRO/ROCHA/OLIVEIRA (2014), S. 53–61.

¹⁹⁷ Vgl. EKOLLU/NARASIMHAN (2005), S. 5.

¹⁹⁸ Der Franz Edelman Award wird vom Institute for Operations Research and Management Science (INFORMS) für herausragende Leistungen zur Anwendung von Operations Research und Management Science in der Praxis verliehen. Informationen zur Preisverleihung in 2002 unter <https://www.informs.org/Recognizing-Excellence/Award-Recipients/Continental-Airlines2> (Stand: 11.02.2018) verfügbar.

¹⁹⁹ Vgl. YU/QI (2004), S. 14f.

²⁰⁰ Vgl. CUNNIGHAM (2016), S. 14.

3.2.3.1 Lufthansa Systems

Mit *NetLine/Ops ++ Solver xOPT* bietet Lufthansa Systems eine Ergänzung zu ihrem Ops Control System *NetLine/Ops* an.²⁰¹ Dabei kann die externe Applikation What-Ifs mit *NetLine/Ops ++* austauschen und es existiert, wie in Abbildung 3.2 gezeigt, eine zusätzliche graphische Oberfläche zur Steuerung.

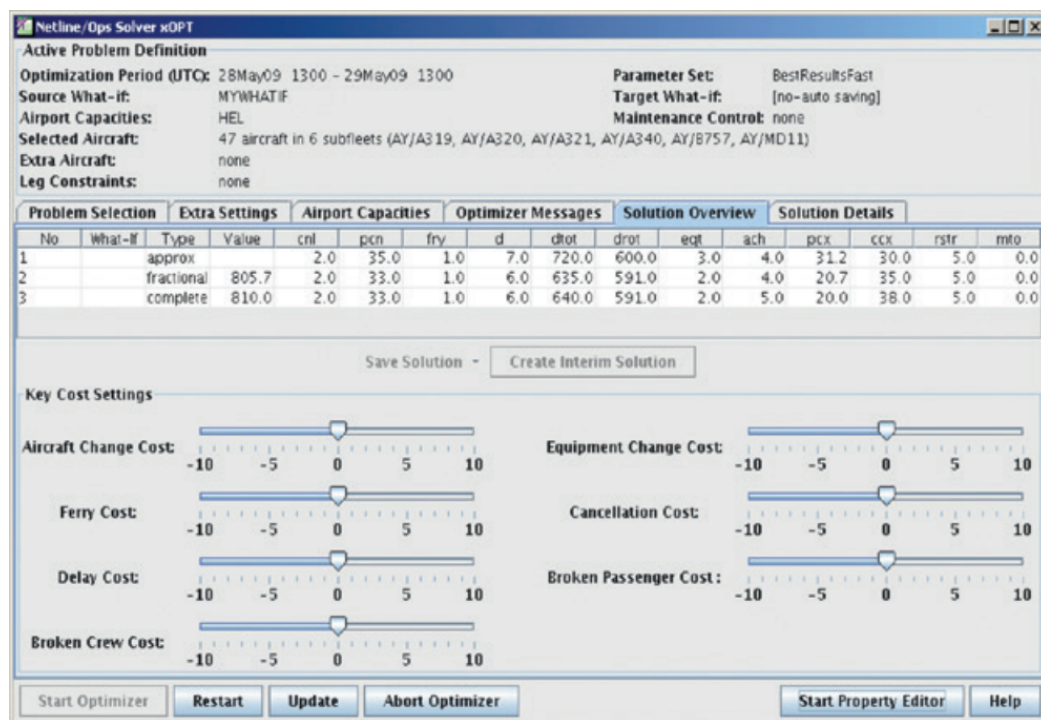


Abbildung 3.2: *NetLine/Ops ++ Solver xOPT* [Quelle: https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2017/pb_netline_opssolver_tail_2.pdf (Stand 10.02.2018)]

In dieser können zusätzliche Restriktionen z.B. für Flugzeuge oder Flughäfen eingegeben sowie Zielparameter verändert werden. Dabei verwendet der Solver einen heuristischen Ansatz. Hervorgehoben wird, dass bei der Lösungsfindung immer die Wartungsanforderungen eines jeden Flugzeuges und Crewumsteiger exakt berücksichtigt werden können. Um eine Lösung zu bewerten, wird auch eine Kennzahlübersicht der Lösung mit der Anzahl der vorgeschlagenen Flugstreichen, Verspätungen etc. präsentiert.

²⁰¹ Vgl. https://www.lhsystems.de/sites/default/files/product/2017/pb_netline_opssolver_tail_2.pdf (Stand 10.02.2018).

3.2.3.2 Sabre Airline Solutions

Sabre Airline Solutions bietet als integrierte Ergänzung ihres Operations Control Systems eine Komponente namens *Sabre® AirCentre™ Recovery Manager*.²⁰² Wie in Abbildung 3.3 zu sehen, ist diese dabei direkt in Form einer Toolbar in dem Gantt-Chart des Operations Control System integriert.

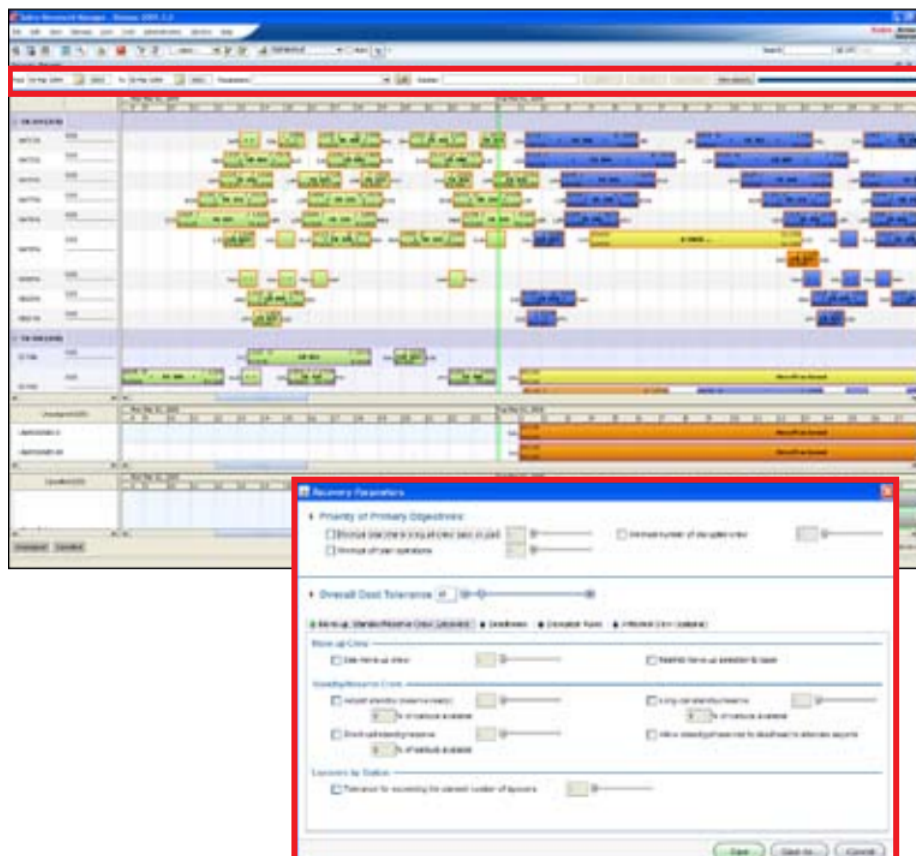


Abbildung 3.3: Sabre® AirCentre™ Recovery Manager [Quelle: https://www.sabreairlinesolutions.com/images/uploads/Recovery_Manager_Profile.pdf (Stand: 10.02.2018)]

Von dort lassen sich zusätzliche Fenster öffnen, in denen Zielparameter und berücksichtigte Nebenbedingungen eingegeben bzw. angewählt werden können. Dabei werden die Dimensionen Flugplan, Flugzeug, Crew und Passagier integriert betrachtet. Darüber hinaus kann das Tool nicht nur für das Management von kleineren Abweichungen, sondern auch in größeren Störsituationen eingesetzt werden.

²⁰² Vgl. https://www.sabreairlinesolutions.com/images/uploads/Recovery_Manager_Profile.pdf (Stand: 10.02.2018).

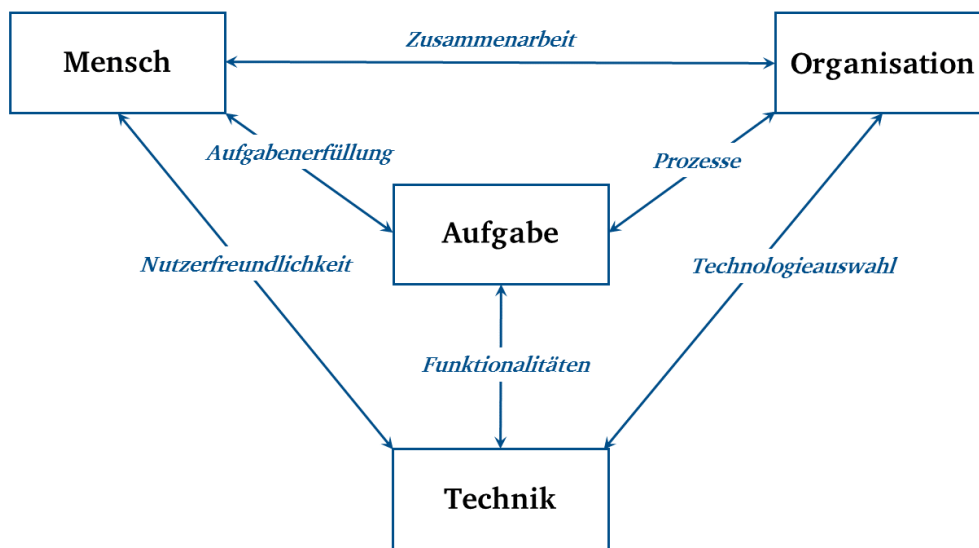


Abbildung 3.5: Verwendung des Leavitt-Diamanten zur Darstellung verschiedener Erfolgsfaktoren im Kontext von Entscheidungsunterstützungssystemen

In den nächsten Abschnitten sollen entsprechend der obigen Darstellung Anforderungen zur Lösung der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Anwendungsfälle aus den entsprechenden Beziehungen identifiziert und beschrieben werden:

- **Funktionalitäten:** Zur Unterstützung der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Anwendungsfälle werden entsprechende fachliche Funktionalitäten benötigt.
- **Technologieauswahl:** Damit sich ein System in die IT-Landschaft der Organisation einfügen kann, müssen adäquate Technologien und Methodiken eingesetzt werden.
- **Nutzerfreundlichkeit:** Um eine reibungslose und zielgerichtete Zusammenarbeit zwischen Anwender und System zu sichern, muss die Nutzerfreundlichkeit sichergestellt sein.
- **Zusammenarbeit:** Gerade im Rahmen der Einführung eines solchen Systems gibt es bei der Zusammenarbeit verschiedener Stakeholder innerhalb der Organisation einige Aspekte zur besonderen Berücksichtigung.

Zu den Prozessen siehe die ausführlichen Darstellungen in Kapitel 2.

Die in den nächsten Abschnitten präsentierten Anforderungen können dabei von den Aufgaben der Verkehrszentrale aus Kapitel 2 logisch abgeleitet sein, aus der Literatur unter 3.2.1 identifiziert worden sein oder repräsentieren gesammelte Erfahrungen im Rahmen der vierjährigen Forschungsk Kooperation zwischen der TU Darmstadt und einem Konzern von europäischen Fluggesellschaften.

3.3.1 Funktionalitäten

Je nachdem welche der Dimensionen Flugplan, Flugzeugeinsatz, Creweinsatz oder Passagierbuchungssteuerung unterstützt werden soll, müssen verschiedene Funktionalitäten im System implementiert werden, um Lösungsvorschläge für die jeweilige Dimension zu erarbeiten. Dabei sei an dieser Stelle nochmal gesagt, dass ein Entscheidungsunterstützungssystem nicht die Anforderungen aller Dimensionen auf einmal berücksichtigen muss, sondern nur diese, für dessen Einsatz es bestimmt ist.

Um insbesondere qualitative Verbesserungen in den Entscheidungen zu generieren, ist es notwendig, dass bei der Implementierung eines Systems nicht bereits in Lösungen gedacht wird, sondern zuerst in Anforderungen.

Anforderung 1. *Anforderungen an ein Entscheidungsunterstützungssystem sollten echte Anforderungen sein und keine Lösungen beschreiben.*

Menschen denken naturgemäß oft in Lösungen und nicht in Anforderungen. Diese Problematik soll an folgendem Beispiel verdeutlicht werden:

Zur Bewertung von Flugstreichungen können Streichlisten herangezogen werden, in denen bereits Abfolgen von Flügen aufgeführt werden, bei denen keine weiteren Umplanungen des Creweinsatzes erforderlich sind. So könnte die Anforderung abgeleitet werden, dass diese Liste in der Lösungsfindung berücksichtigt wird. Allerdings ist nicht das Berücksichtigen der Liste eine Anforderungen, sondern dass die Creweinsatzsteuerung bei Flugstreichungen möglichst wenige Umplanungen durchführen muss. Die Anwender nutzen diese Liste nur als vereinfachtes Vorgehen bzw. Lösung anstatt die vollständigen Möglichkeiten der Umplanung der Crew in Betracht zu ziehen und zu bewerten.

In den folgenden Abschnitten sollen die Anforderungen für benötigte Funktionalitäten der Dimensionen Flugplan, Flugzeugeinsatz, Creweinsatz und Passagierbuchungssteuerung identifiziert werden.

3.3.1.1 Flugplan

Entsprechend der Handlungsoptionen nach Abschnitt 2.1.2.1 muss die zeitliche Lage von Flügen angepasst werden.

Anforderung 2. *Ein System soll Verspätungen für Flüge berücksichtigen. Dabei muss pro Flug festlegbar sein, wie viele Verspätungsminuten zugelassen sind und welche Kosten pro Minute Verspätung anfallen.*

Anforderung 3. *Ein Flug soll vor seinen geplanten Abflug verschoben werden können. Dabei muss pro Flug festlegbar sein, ob und wie viele Minuten der Verfrühung zugelassen sind sowie die Kosten pro Minute für den Vorzug.*

Nach den Abschnitten 2.1.2.2 und 2.1.2.3 müssen auch Flüge entfernt oder hinzugefügt werden können.

Anforderung 4. *Es sollen Streichungen berücksichtigt werden. Dabei ist pro Flug individuell zu berücksichtigen, ob dieser überhaupt gestrichen werden darf oder nicht und welche Kosten dafür anfallen.*

Dabei müssen wichtige Flüge von einer Streichung ausgeschlossen werden können, wenn es sich beispielsweise um bestimmte Sonderflüge oder erst im Markt neu eingeführte Flüge handelt.

Anforderung 5. *Es sollen Kandidaten für Positionierungsflüge auf Basis von verfügbaren Blockzeiten angelegt werden. Dabei müssen wie bei allen anderen Flügen auch die Anforderungen aus den Abschnitten Flugzeugeinsatz (3.3.1.2) und Creweinsatz (3.3.1.3) berücksichtigt werden. Dabei ist für jeden möglichen Positionierungsflug ein Kostensatz anzugeben.*

Um die Anforderungen an die Positionierungsflüge berücksichtigen zu können, müssen diese auch explizit als mögliche Kandidaten modelliert werden. Denn auch ein Positionierungsflug darf nicht während eines Nachtflugverbotes starten oder landen und das zugewiesene Flugzeug muss technisch in der Lage sein, die Strecke fliegen zu können bzw. zu dürfen.

Dass solche Anpassungen mit einer gewissen Vorlaufzeit durchgeführt werden müssen, ist eine inhärente Bedingung, wenn sehr kurzfristig auf Störungen reagiert werden muss.

Anforderung 6. *Flüge, die bereits Off-Block sind, dürfen nicht mehr nach den obenstehenden Handlungsoptionen angepasst werden.*

Dies wird in der Literatur nahezu nicht behandelt, da die konstruierten Fallbeispiele meist nicht den Zeitpunkt im Betrieb enthalten, an dem die Lösung für das aufgetretene Problem zu erarbeiten ist. Es macht einen Unterschied, ob ein kurzfristiges AOG direkt nach der Landung zur Tagesmitte auftaucht oder bereits während der Wartung in der Nacht, so dass zwischen dem Zeitpunkt der Bekanntgabe und dem Einsatz zu Tagesbeginn noch mehrere Stunden in der Zukunft liegen.

Neben den Handlungsoptionen auf einzelnen Flügen müssen auch die Nebenbedingungen bei den Verkettungen von Flügen berücksichtigt werden.

Anforderung 7. *Es sollen komplexe Bodenzeiten-Modelle für die Berechnung der Bodenzeit zwischen zwei beliebigen Flügen unterstützt werden, welche sogar für einzelne Flugzeuge separat definiert werden können.*

Dass wenigstens verschiedene Bodenzeiten abhängig vom Flugzeugtyp definiert werden können, wird in der Literatur oft nicht berücksichtigt. Diese Betrachtung ist notwendig, da ein Flugzeugwechsel nach den obigen Schilderungen die entsprechende Bodenzeit verändern kann.

Wie komplex und individuell die Berechnung der Bodenzeit ist, soll anhand des Teilprozesses des Aussteigens (Pax Disembarking oder Deboarding) aufgezeigt werden:

- Flugzeugtyp und Sitzkonfiguration: Je mehr Passagiere aussteigen müssen, desto länger dauert der Prozess. Daher orientiert sich diese Zeit grundsätzlich an der Anzahl der Sitzplätze und Gänge, welche natürlich abhängig vom Flugzeugtyp sind.
- Flughafen und Bodenverkehrsdienste: Ob durch eine, zwei oder mehr Türen ausgestiegen werden kann, hängt davon ab, ob das Deboarding durch einen oder mehrere sogenannte Finger direkt ins Terminal, über Fluggasttreppen oder einer Kombination stattfinden kann. Dabei spielt die Infrastruktur und technische Ausrüstung am Flughafen ebenso eine Rolle wie die Serviceverträge mit den BVD. Das Abfertigen zum Beispiel über mehr als eine Tür benötigt zusätzliches Gerät und Personal.²⁰⁵
- Handgepäckrichtlinien: Je mehr oder größeres Handgepäck auf einem Flug zugelassen sind, desto aufwändiger ist das Ausladen der Gepäckfächer durch die Passagiere im Gang des Flugzeuges und umso länger dauert prinzipiell das Aussteigen.²⁰⁶

Anforderung 8. *Erzwungene Flugverbindungen dürfen nicht aufgebrochen werden, erwünschte Flugverbindungen dürfen unter Anwendung individueller Kosten geändert werden.*

Es kann gefordert sein, dass zwei hintereinander folgende Flüge von ein- und demselben Flugzeug durchgeführt werden müssen. Dies ist insbesondere bei den Multisegment-Flügen der Fall, da hier die Passagiere für weitere Segmente im Flugzeug sitzen bleiben.²⁰⁷

3.3.1.2 Flugzeugeinsatz

Anforderung 9. *Ein Tool muss Flugzeugtäusche zwischen jedem Flugzeug prinzipiell unterstützen. Dabei muss jeder beliebige Flugzeugtausch mit individuellen Kosten bewertbar sein.*

Insbesondere ein Tausch zwischen Subflotten bzw. Flotten ist mit entsprechenden Zusatzkosten verbunden, die berücksichtigt werden müssen.²⁰⁸ Bei einem solchen Tausch müssen aber Verspätungen und Bodenzeiten simultan dazu betrachtet und bewertet werden. Denn eine Änderung des Flugzeuges kann prinzipiell zu veränderten Bodenzeiten führen, was im Falle von mehr benötigter Bodenzeit zu einer Verspätung führen würde (oder eine Verfrühung ermöglicht).

Analog zu den Handlungsoptionen für Flugplanänderungen ist zu beachten, dass ein Flugzeugtausch ebenfalls eine gewisse Vorlaufzeit benötigt.²⁰⁹ Ansonsten muss mit Verspätungen gerechnet werden, wenn ein sich im Turnaround befindliches Flugzeug abgetauscht werden soll, da

²⁰⁵ Vgl. FRANZI (2018), S. 186f.

²⁰⁶ Vgl. MOVIG (2018), S. 196.

²⁰⁷ Vgl. YU/QI (2004), S. 63f.

²⁰⁸ Vgl. YU/QI (2004), S. 65f.

²⁰⁹ Vgl. ABDI/SHARMA (2008), S. 141.

sonst alle bereits durchgeführten Tätigkeiten, wie das Einladen von Koffern, Fracht oder Catering zum Teil rückgängig gemacht werden müssen.

Gerade beim Tauschen zwischen den Flugzeugen müssen die individuellen Unterteilungen der Flotte, wie in Abschnitt 2.1.2.4 dargestellt, berücksichtigt werden. Diese internen Zuordnungen sind dabei nicht fix und können sich dabei von Zeit zu Zeit ändern.

Anforderung 10. *Flugzeuge müssen neben IATA Standard-Unterteilung (Familien und Gruppen) noch in individuelle, von der Fluggesellschaft abhängige Untertypen unterteilt werden können.*

Hin und wieder haben Flugzeuge technische, nicht MEL relevante Einschränkungen, wie etwa eine defekte Toilette oder APU (Auxiliary Power Unit), und zählen damit weiterhin als betriebsfähig. Gerade ein Flugzeug mit einer defekten APU benötigt eine GPU (Ground Power Unit) am Flughafen für den Betrieb der Klimaanlage und das Anlassen der Triebwerke. Das bedeutet, dass Flugzeuge mit diesen Zusatzanforderungen nicht auf bestimmten Strecken oder zu bestimmten Flughäfen eingesetzt werden können.

Anforderung 11. *Der technische Zustand jedes einzelnen Flugzeuges muss bei der Zuweisung auf einen Flug berücksichtigt werden.*

Selbstverständlich muss auch berücksichtigt werden, dass die gebuchten Passagiere auf dem Flug einen entsprechenden Sitzplatz zugewiesen bekommen.

Anforderung 12. *Die Anzahl der gebuchten Passagiere darf die Gesamtkapazität in der Sitzklasse des Flugzeuges inkl. eines Toleranzwertes nicht überschreiten. Dabei müssen verschiedene mögliche Sitzversionen des Flugzeuges in Betracht gezogen werden.*

Gerade bei Kurzstreckenflugzeugen in Europa kann es einen flexibel positionierbaren Vorhang geben, der die Kabine der prinzipiell einheitlichen Sitzplätze in Business und Economy unterteilt.²¹⁰ In der Business Class bleiben dann einige Sitze leer, um so in jeder Reihe durch freie Mittelsitze zusätzlichen Freiraum zu erzeugen. Dementsprechend variiert abhängig von der Position des Vorhangs die Gesamtzahl der zu belegenden Sitze in einer Kategorie.

Auch eingeplante Bodenereignisse müssen für das Flugzeug berücksichtigt werden. Dabei können analog zu den Flügen die folgenden Handlungsoptionen wie in Abschnitt 2.1.2.6 berücksichtigt werden.

Anforderung 13. *Ein Tool soll die zeitliche Lage von Bodenereignissen anpassen können. Dabei sind pro Ereignis maximale Grenzen für die zeitliche Verschiebung zu berücksichtigen und individuelle Kostenwerte pro Minuten zu berücksichtigen.*

Anforderung 14. *Ein Tool soll die Bodenereignisse streichen können. Dabei ist pro Ereignis individuell zu berücksichtigen, ob dieses überhaupt gestrichen werden darf und welche Kosten dafür anfallen.*

²¹⁰ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 156.

Gerade das Streichen von Bodenereignissen steht in Verbindung mit den Reservekapazitäten. Nicht jede Fluggesellschaft kann oder will eine größere Anzahl von Reserveflugzeugen vorhalten. Daher besteht die Möglichkeit, dass eine ganztägige Reservekapazität auf verschiedene Flugzeuge verteilt ist oder dass Reservekapazitäten zweckgebunden sind, also primär für ungeplante Reparaturen anderer Flugzeuge oder dediziert zum „Abtausch“ für verspätete Flüge eingesetzt werden sollen.

Anforderung 15. *Der Einsatz einer Reservekapazität muss konfigurierbar sein. Es muss also einstellbar sein, ob diese aufgelöst oder gekürzt werden darf und wenn ja, welche Kosten dafür anfallen.*

In der Literatur wird entgegen der Realität oft angenommen, dass Reserven immer auf dedizierten Flugzeugen zur Verfügung gestellt werden.²¹¹

Bei der Anwendung der vorherig genannten Handlungsoptionen zur Umplanung von Bodenereignissen muss jedoch stets sichergestellt sein, dass die Wartungsvorgaben für das Flugzeug erfüllt sind. Denn ein Flugzeug mit überfälligem Check zählt automatisch als AOG.

Anforderung 16. *Bei der Umplanung von Wartungsereignissen muss die Einhaltung der maximalen Check-Limits des Flugzeuges garantiert werden.*

Da Fluggesellschaften oder entsprechende Dienstleister meist an mehreren Flughäfen die Wartung von Flugzeugen durchführen können, muss dies auch durch ein Tool berücksichtigt werden.

Anforderung 17. *Ein Bodenereignis kann auf einen anderen Flughafen unter Anwendung eines Kostensatzes verschoben werden. Dabei muss sichergestellt sein, dass dieser Flughafen in der Lage ist, das Bodenereignis für das zugewiesene Flugzeug unter Berücksichtigung der Wartungskapazität durchzuführen.*

Die vielfache Annahme in der Forschung, dass Wartungsanforderungen der Flugzeuge nicht berücksichtigt werden müssen, da sie mit einer hohen Wahrscheinlichkeit trotzdem erfüllt oder manuell angepasst werden können, spiegelt in keiner Weise die unternehmerische Praxis wider. Dies steht repräsentativ für die Diskrepanz zwischen Forschung und Praxis.

3.3.1.3 Creweinsatz

Wie in Abschnitt 2.1.2.7 beschrieben, müssen bei einem Wechsel der Crew insbesondere eine Reihe von Legalitätskriterien überprüft werden. Viele Fluggesellschaften legen heute aber auch Wert darauf, dass die Änderungen für das Personal möglichst wenig Einschränkungen für deren Frei- und Ruhezeit bedeuten.

Anforderung 18. *Anforderungen bezüglich Anzahl, Position (sogenanntes Crew Complement) und Qualifikation (Type Rating) der Crew an das zugewiesene Flugzeug bzw. den Flug müssen sichergestellt werden.*

²¹¹ Vgl. TEODORVIĆ/STOJKOVIĆ (1990), S. 275.

Mit flugbezogenen Anforderungen sind hier in der Regel die benötigten Spezial-Qualifikationen der Piloten bei gewissen Strecken oder Flughäfen gemeint.

Insbesondere bei Verspätungen müssen die gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Dienstzeit eingehalten werden. Dazu gehören neben der reinen Flugzeit auch eine definierte, allgemeine Zeit für das Vor- und Nachbereiten einer Schicht.

Anforderung 19. *Flug-, Dienst- und Ruhezeiten auf Basis von betrieblichen, tariflichen oder gesetzlichen Grenzen müssen für jedes Personal individuell eingehalten werden. Ausnahmegenehmigungen können unter Kostenaufwänden berücksichtigt werden.*²¹²

Müssen Teile oder das ganze Personal im Rahmen ihres Einsatzes das Flugzeug wechseln, so muss eine Umsteigezeit berücksichtigt werden, welche neben der reinen Wegzeit von A nach B auch Zeit zur Anfertigung und Abarbeitung von Übergabeunterlagen beinhaltet. Wenn die Crew geschlossen auf dem Flieger bleibt, so entfällt diese.²¹³

Anforderung 20. *Umsteigezeiten zwischen Flügen müssen mindestens pro Flughafen und Position eingehalten werden.*

3.3.1.4 Passagierbuchungssteuerung

Gerade im Falle von Flugstreichungen müssen Passagiere umgebucht werden, damit sie ihre Reise zum Zielort fortsetzen können.

Anforderung 21. *Es müssen Reisewege und die in Abschnitt 2.1.2.8 genannten Eigenschaften der Passagiere berücksichtigt werden. Dabei sollen Passagiere bei Streichungen oder verpassten Anschlüssen durch Umbuchungen ihren Zielort mit möglichst minimaler Verspätung erreichen können. Jeder neue, potentielle Reiseweg des Passagiers ist mit einem individuellen Kostensatz zu bewerten.*

Manchmal kann es dabei passieren, dass eine Person durch eine Umbuchung sogar vor ihrer eigentlichen Ankunftszeit den Zielort erreicht. Dabei muss bei Buchungen von mehreren Flügen die Generierung der neuen Reisewege nicht zwangsläufig dieselben Flughäfen wie ursprünglich enthalten. Um das Beispiel aus Abschnitt 2.2.1.11 aufzugreifen, kann aus dem Reiseweg Luxemburg-Frankfurt-Houston-New Orleans auch Luxemburg-München-New York-New Orleans werden. Gerade um bei Verspätungen zu überprüfen, ob der bisherige Reiseweg noch valide ist oder bei der Generierung neuer Alternativen, müssen Umsteigezeiten bei mehreren Flügen beachtet werden.

Anforderung 22. *Minimale Umsteigezeiten von Passagierumsteigern oder Transitgästen müssen mindestens pro Flughafen, Fluggesellschaft und Transitzone (International, Inländisch) berücksichtigt und eingehalten werden.*

²¹² Vgl. SONG/WEI/YU (2002), S. 264f.

²¹³ Vgl. WIESKE-HARTZ (2000), S. 74.

Im Jahr 2000 beispielsweise betrug auf dem Flughafen Wien die allgemeine Transferzeit 25 Minuten, während für Lissabon bei internationalen Umsteiger 60 Minuten angegeben waren.²¹⁴ Bei größeren Gruppen von Anschlussgästen werden auch Abflüge verspätet, da eine Umbuchung in der Regel dann deutlich kostenintensiver ist. Bei der Berechnung neuer Alternativen müssen daher auch die Kapazitäten auf den potentiellen Umbuchungsflügen gemäß Anforderung 12 sichergestellt werden.

An dieser Stelle sei zu sagen, dass für die Passagierbuchungen nicht immer eine exakte Lösung gefordert ist. Gerade bei Störungen wie Streiks und widrigen Wettersituation können oder wollen viele Fluggäste auch gar nicht zu den Flügen erscheinen.

3.3.2 Technologieauswahl

Da ein Entscheidungsunterstützungssystem per Definition ein computerbasiertes System ist, muss dieses in die IT-Systemlandschaft der Verkehrszentrale integriert werden. Dabei zählen die in einem EUS implementierten Modelle und Algorithmen daher ebenfalls zu den technischen Anforderungen. Die nächsten beiden Abschnitte widmen sich deshalb den beiden Aspekten der technischen Anforderungen an Software und IT sowie Modelle und Algorithmen.

3.3.2.1 Software und IT

Abgesehen von den allgemeinen Anforderungen und Vorgehensweisen, die im Rahmen einer jeden Softwareentwicklung berücksichtigt werden müssen, sollen an dieser Stelle die speziell für die Entscheidungsunterstützungssysteme in der Verkehrszentrale relevanten Aspekte beleuchtet werden.

Da die Erfahrung und das Urteilsvermögen der Verkehrsleiter für die Entscheidungsfindung von zentraler Bedeutung sind, muss ein nahtloses Zusammenspiel von Anwender und System garantiert werden.²¹⁵

Anforderung 23. *Das Tool sollte nahtlos in das oder die Informations- und Kommunikationssysteme der Anwender analog Abschnitt 2.3 integriert werden.*

Zur effizienten Arbeitsweise und den stellenweise benötigten Entscheidungen in Echtzeit ist es daher zwingend notwendig, dass ein solches System in der Arbeitsumgebung direkt verfügbar ist und der Anwender nicht zwischen verschiedenen Anwendungen wechseln muss, wie es beispielsweise bei dem Produkt von Amadeus (3.2.3.3) der Fall ist. Dass verschiedene Softwareanwendungen und Datenbanken technisch nicht miteinander arbeiten können, stellt allerdings schon seit Beginn des letzten Jahrzehnts ein allgegenwärtiges Problem in der Verkehrszentrale dar.²¹⁶ Schaut man sich die Produktpalette der Lufthansa Systems aus Abschnitt 2.3 genauer an, so ist

²¹⁴ Vgl. NICHOLS/SALA (2000), S. 406.

²¹⁵ Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 151.

²¹⁶ Vgl. ROGERS/ALLEN/HOYME (2000), S. 158.

festzustellen, dass die verschiedenen Softwareprogramme eigentlich alleinstehende Komponenten sind. Deshalb ist es umso wichtiger, dass ein entsprechendes Entscheidungsunterstützungssystem in der technischen Realisierung möglichst flexibel an verschiedene Softwareprodukte anschließbar ist.

Dabei stellt die Datenverfügbarkeit eine grundlegende Voraussetzung für erfolgreiche Entscheidungsunterstützungssysteme dar.²¹⁷ Nicht immer sind alle Daten in den Systemen verfügbar, die zur Entscheidungsfindung notwendig sind, sondern sind in den Köpfen der Anwender gespeichert oder befinden sich in nicht-digitalisierten Medien.

In der Literatur sind experimentelle Ergebnisse zumeist auf einzelnen PCs mit maximaler Leistung durchgeführt. In der Praxis sind solche Ressourcen nicht uneingeschränkt verfügbar. Außerdem werden in der praktischen Anwendung mehrere Nutzer gleichzeitig ein solches System nutzen wollen.

Anforderung 24. *Es müssen skalierbare und flexible IT-Technologien eingesetzt werden, um die Anwendung parallel mit notwendiger Leistung einsetzen zu können.*

Heutzutage bieten Cloud-Lösungen von Google, Amazon und Microsoft viele Möglichkeiten der Skalierung der Leistung. Gerade um auch die Anwendung auf den Cloudtechnologien zu nutzen, bedarf es einer durchdachten Auswahl der Software-Technologie. In diesem Zuge muss natürlich der Datenschutz adäquat berücksichtigt werden.

3.3.2.2 Modelle und Algorithmen

Da die Angebote der Fluggesellschaften aus einem breit gefächerten Spektrum von Produktkategorien, geographischen Schwerpunkten, Netzwerken von Fluglinien und Flottenstrukturen besteht, sollten Modelle diesbezüglich keine Einschränkungen mit sich bringen.²¹⁸ Ein System sollte unabhängig davon funktionieren, ob beispielsweise ein Hub-and-Spoke Netzwerk oder Punkt-zu-Punkt-Verkehr betrieben wird.²¹⁹

Anforderung 25. *Ein Modell sollte keine Einschränkungen für spezielle Charakteristiken im Flugplan, bei den Netzwerken oder für Typen von Fluggesellschaften mit sich bringen.*

Insbesondere die Steuerung von inländischen im Gegensatz zu internationalen Flügen weist substantiell verschiedene Charakteristiken, wie etwa die Anzahl und Dauer der zu betrachtenden Flüge, die Komplexität der Crewpläne sowie die Anzahl der Passagiere und geladene Fracht pro Flug, auf.²²⁰

²¹⁷ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 137.

²¹⁸ Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 100–102.

²¹⁹ Vgl. WU (2010), S. 166.

²²⁰ Vgl. BRUCE (2018), S. 324–326.

Sind hochspezialisierte mathematische Methodiken im Einsatz, so gibt es in den meisten Fällen nur eine minimale Anzahl von Experten, die ein derartiges Tool pflegen, betreiben und weiterentwickeln können. Um diesen Personalengpass zu vermeiden, sollten keine Spezialalgorithmen eingesetzt werden.

Anforderung 26. *Es sind möglichst standardisierte und etablierte Modelle und Algorithmen, wie beispielsweise durch kommerzielle Löser bereitgestellt, einzusetzen.*

Die große Mehrheit von Problemstellungen im Kontext von Fluggesellschaften können in der Regel durch Ansätze der ganzzahligen Optimierung modelliert werden.²²¹ Daneben muss das System in der Lage sein, unter allen möglichen Rahmenbedingungen eine optimale Lösung zu errechnen. Denn gerade in kleinen Fällen sind die Anwender in der Regel in der Lage, die beste Lösung bestimmen zu können. Deshalb muss auch in größeren Szenarien sichergestellt werden, dass ein System „gute“ Lösungen liefert. Dabei meint eine gute Lösung, dass eine festgelegte maximale Abweichung zur optimalen Lösungen garantiert wird.

Anforderung 27. *Das System muss unter den gegebenen Rahmenbedingungen die optimale Lösung oder wenigstens eine Lösung mit garantierter Güte ermitteln können.*

Es gibt nur sehr wenige bis gar keine Heuristiken, die ein garantiertes Optimum oder eine Lösung mit garantierter Güte liefern können.²²² In diesem Fall bietet sich ein Modell der ganzzahligen Optimierung an, welches durch einen exakten Algorithmus gelöst wird. Im nächsten Kapitel soll noch genauer auf diese Thematik eingegangen werden.

Gerade in der Wartung ist wichtig, dass keine zufällige Komponente im Lösungsalgorithmus vorhanden ist. Bei exakt den selben Eingangsdaten sind dieselben Rechenschritte mit dem identischen Ergebnis zu erwarten.

Anforderung 28. *Es wird eine deterministische Methodik zur exakten Reproduzierbarkeit des Lösungsverfahrens gefordert.*

Meistens werden im Rahmen der Forschungsarbeiten nur eine sehr geringe Anzahl von Variationen eines Anwendungsfalls getestet.

Anforderung 29. *Ein aus Abschnitt 3.1 unterstützter Anwendungsfall sollte möglichst generisch unterstützt werden.*

Zum Beispiel wird oft im Rahmen des Anwendungsfalles 2 aus Abschnitt 3.1 nur eine komplette Schließung eines Flughafens betrachtet, also mit einer Rate von 0 der Worst-Case Fall.

²²¹ Vgl. BAZARGAN (2010), S. 7.

²²² Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 362.

3.3.3 Nutzerfreundlichkeit

Damit solche Systeme erfolgreich eingesetzt werden können, müssen diese eine intuitive Benutzerschnittstelle besitzen um eine reibungslose Zusammenarbeit mit dem Anwender zu ermöglichen. In den folgenden drei Abschnitten wird daher beschrieben, welche Möglichkeiten für die Eingabe, Interaktionen und Ausgabe des Systems aus Sicht des Anwenders bestehen sollten. Damit die verschiedenen Anforderungen zwischen Anwender und Technik in Einklang stehen, sollten an der Schnittstelle zwischen Anwender und Technik unbedingt Analysten in Form einer OR-Querschnittsfunktion vermitteln.²²³

3.3.3.1 Konfiguration der Anwendungsfälle

Die mitunter wichtigste Anforderung ist, dass der Anwender selbst bestimmt, auf welcher Basis ein System ihm Vorschläge liefern soll.

Anforderung 30. *Es muss ein Zeitfenster definierbar sein, in welchem Änderungen umgesetzt werden können, um am Ende dieses Zeitfensters wieder zum regulären Plan zurückgekehrt zu sein.*

In der Literatur wird oft davon gesprochen, dass nach einer Störung so schnell wie möglich zum normalen Betrieb zurückgekehrt werden soll.²²⁴ Das ist zwar prinzipiell richtig, aber am Ende muss es dem Anwender überlassen bleiben, den maximalen Zeitraum selbst festzulegen. Denn hin und wieder bedeutet „so schnell wie möglich“ im Plan zu sein, dass ein harter Einschnitt ins System vorgenommen werden müsste, was aus Sicht der Passagiere zur sehr suboptimalen Lösungen führen kann.²²⁵ Deshalb kann auch bewusst zugelassen werden, dass noch Auswirkungen von Störungen auf Folgetage übertragen werden.²²⁶ Deshalb sind im Fall von mehreren Dimensionen auch verschiedene Zeitfenster festzulegen.

Anforderung 31. *Falls mehrere Dimensionen berücksichtigt werden, müssen die jeweiligen Zeitfenster, in denen Planänderungen vorgenommen werden dürfen, separat einstellbar sein.*

Dabei ist neben der Zeit auch festzulegen, für welche konkreten Ressourcen aus den berücksichtigten Dimensionen die Vorschläge zu generieren sind.

Anforderung 32. *Der Anwender entscheidet selbst, welche konkreten Flüge, Flugzeuge, Crews und/oder Passagierreisen in die Lösungsfindung einbezogen und berücksichtigt werden müssen. Dabei müssen explizite Änderungen für einzelne Ressourcen verboten werden können.*

Es ist schlussendlich von der konkreten Ausgangslage abhängig, welche einzelnen Ressourcen zur Lösungsfindung inkludiert werden. In den untersuchten Forschungsarbeiten werden beispielsweise oft Flugzeuge im Modell exkludiert, die nicht von einer Störung betroffen werden.

²²³ Vgl. ANDERSSON (1989), S. 10.

²²⁴ Vgl. YAN/YANG (1996), S. 408.

²²⁵ Vgl. COOK/BILLIG (2017), S. 150.

²²⁶ Vgl. GRANDEAU/CLARKE/MATHAISEL (2002), S. 323.

Insbesondere auf Grund der kombinatorischen Natur der Probleme steigt die Laufzeit mit wachsender Größe des Problems meist nicht-linear an. Eine Reduzierung beschleunigt zwar dann die Laufzeit, aber verschlechtert unter Umständen signifikant die Lösungsqualität. Folgendes Beispiel soll das Problem dabei verdeutlichen:

Wird ein Flug gestrichen, kann möglicherweise ein nicht betroffener Folgeflug einem größeren Flugzeug zugewiesen werden, um zusätzliche Passagiere des gestrichenen Fluges transportieren zu können. Dazu muss oft das dem Folgeflug ursprünglich zugewiesenen Flugzeug den Flug mit einem größeren Flugzeug tauschen obwohl dessen geplanter Flug unter Umständen nicht von der Störung betroffen ist.

Wenn solche Reduzierungen durchgeführt werden sollen oder müssen, wäre der Einsatz eines Geschäftsregelmanagementsystems von Vorteil, mit der abhängig vom Anwendungsfall eine geeignete Reduzierung der Komplexität vorgenommen werden kann.

Auch sollte der Anwender die Kontrolle über die zur Lösungsfindung berücksichtigten Ziele unter Kontrolle behalten.

Anforderung 33. *Der Anwender entscheidet über die individuelle Gewichtung der Zielparameter bei der Lösungsfindung.*

Dabei sollten nicht jedes Mal alle Ziele neu definiert werden. Der Anwender sollte in der Regel nur in Sondersituationen von standardisierten, vorgegeben Zielparametern abweichen dürfen. Denn insbesondere kann die Performanz des Systems auf Grund der kombinatorischen Natur von einer einzelnen, kleinen Änderung bereits negativ beeinflusst werden.

Anforderung 34. *Es müssen standardisierte Voreinstellungen von Zielparametern vorausgewählt werden können.*

Gerade im Falle von Passagierentschädigungskosten eines vom EU-Recht umfassten Fluges ist es notwendig zu unterscheiden, ob es sich bei der Störung um außergewöhnliche Umstände handelt oder nicht. Gerade bei den Passagieren kann unter verschiedenen Prämissen gesteuert werden. Während zu Ferienzeiten oder an Feiertagen Passagiere so schnell wie möglich an ihr Ziel gebracht werden sollen, wird an anderen Tagen der Kostenfaktor durch die Fluggesellschaft bei der Umbuchung stärker berücksichtigt.²²⁷ Dabei gilt generell für Zielparameter, dass diese nicht unbedingt echte monetäre Kosten repräsentieren müssen.²²⁸

Anforderung 35. *Es muss konfigurierbar sein, wie genau die neuen Einsatzpläne nach einer Störung wieder anknüpfen.*

Gerade der Flugzeugeinsatz wird oft als rollender Horizont geplant.²²⁹ Daher muss der Plan nur bis zum aktuellen Horizont korrekt betrachtet werden. Entsprechende Probleme, wie beispielsweise im Crew-Bereich, können außerhalb des Horizontes dann zu einem späteren Zeitpunkt durch die Planungsabteilungen behoben werden.²³⁰

²²⁷ Vgl. ABDI/SHARMA (2008), S. 142.

²²⁸ Vgl. YU/QI (2004), S. 24.

²²⁹ Vgl. LAPP/WIKENHAUSER (2012), S. 25.

²³⁰ Vgl. FENNELL (2018), S. 135f.

3.3.3.2 Interaktion zwischen Anwender und System

Damit ein interaktiver Arbeitsfluss zwischen Nutzer und System realisiert werden kann, muss der Anwender das System mehrfach innerhalb der Lösungsfindung nutzen können.²³¹

Anforderung 36. *Systeme müssen in der Lage sein, auf Basis einer manuellen oder bereits vorher berechneten Teillösung eine erneute Lösungsfindung anzustoßen.*

In Kombination mit Anforderungen 32 und 33 hat so der Anwender die Möglichkeit, Teile einer Lösung zu verwerfen oder manuell zu ändern, entsprechende Fixierungen vorzunehmen und weitere Berechnungen unter modifizierten Zielvorgaben anzustoßen.

Gerade für den in Abschnitt 2.2.3 dargestellte Entscheidungsprozess ist es für die Abstimmung zwischen mehreren Anwendern von Vorteil, wenn eine Reihe von Lösungsvorschlägen für eine konstruktive Diskussion zur Verfügung stehen.

Anforderung 37. *Systeme müssen in der Lage sein, dass sie verschiedene Lösungen auf Basis unterschiedlicher Voreinstellungen gleichzeitig berechnen können.*

Auf der anderen Seite gibt es immer wieder Daten und Informationen, die nicht in die Berechnung eingelaufen sind oder einlaufen können. Ein häufig genanntes Beispiel sind die Hotelverfügbarkeiten in einer Stadt.²³² Deshalb muss sich der Anwender mehrere Alternative generieren können, um dann zu entscheiden, welche unter den nicht vollständig berücksichtigten Informationen die bessere Lösung ist. Außerdem haben mehrere verschiedene Lösungen das Potential, ein verbessertes Situationsbewusstsein für den Anwender zu schaffen. Da einige aufgabenbezogenen Aspekte nicht adäquat in der Forschung abgebildet sind und so zu inakzeptablen Lösungen für Anwender führen können, müssen oft mehrere Lösungen generiert werden, damit durch Variation überhaupt eine akzeptable Lösung zu finden ist.

3.3.3.3 Umsetzung der Lösung

In der Literatur wird oft davon ausgegangen, dass eine Lösung so schnell wie möglich präsentiert werden muss.²³³ Es hängt aber natürlich vom Störungstyp und der entsprechenden Vorlaufzeit ab, wie schnell eine Entscheidung getroffen muss.

Anforderung 38. *Abhängig vom Anwendungsfall müssen Lösungsvorschläge innerhalb eines definierten Zeitraums geliefert werden, damit rechtzeitig eine Entscheidung getroffen werden kann.*

Beispielsweise kann der Prozess der Lösungsfindung im Anschluss an eine Streikankündigung 24 Stunden im Voraus durchaus mehrere Stunden in Anspruch nehmen, so dass ein System eine Lösung nicht im einstelligen Minutenbereich liefern muss. Dabei müssen die interaktiven Schritte

²³¹ Vgl. TEODOROVIĆ/STOJKOVIĆ (1990), S. 275f.

²³² Vgl. YU/QI (2004), S. 80.

²³³ Vgl. YU/QI (2004), S. 23; TEODOROVIĆ/STOJKOVIĆ (1990), S. 278.

berücksichtigt werden. Hat ein Anwender beispielsweise 5 Minuten Zeit für die Lösungsfindung, könnte die Laufzeit des Entscheidungsunterstützungssystems auf eine Minute begrenzt werden, so kann der Anwender 2-3 sequentielle Berechnungen starten und hat noch Zeit für manuelle Anpassungen und Analyse der gelieferten Teillösungen. Damit ein solcher Prozess möglichst effizient vonstatten gehen kann, sollten Ergebnisse immer in Formen von Kennzahlen auch aggregiert dargestellt werden können.

Anforderung 39. *Es müssen zusammenfassende Kennzahlen eines Ergebnisses präsentiert werden.*

Auf Grund des hohen Stellenwertes der Sicherheit muss dabei am Ende immer der Anwender die Umsetzung einer Lösung autorisieren.

Anforderung 40. *Entscheidungen dürfen nicht vollautomatisiert getroffen werden.*

Es kann als unrealistisch betrachtet werden, dass Entscheidungen in der Verkehrszentrale vollautomatisch getroffen werden können.²³⁴

3.3.4 Zusammenarbeit

Neben den im vorherigen Abschnitt aufgeführten Anforderungen an die Zusammenarbeit zwischen Anwender und System existieren ebenso solche zwischen Anwender und der gesamten Organisation. Die folgenden beiden Abschnitte sollen sich damit beschäftigen, welche Maßnahmen aus Sicht der Organisation getroffen werden können, um die Einführung eines solchen Systems möglichst erfolgreich zu gestalten.

3.3.4.1 Einbeziehung und Training der Anwender

Anwender müssen sich im Rahmen der Einführung eines Entscheidungsunterstützungssystems oft erst an die damit verbundenen Veränderung gewöhnen. Wenn solche Systeme ohne Beteiligung der Anwender seitens des Managements eingeführt werden, so wird es immer Gründe seitens der Entscheider geben, um ein System in der Anwendung scheitern zu lassen.²³⁵

Anforderung 41. *Die Anwender müssen von Beginn der Entwicklung in das Projekt mit einbezogen werden.*

Es darf nicht vergessen werden, dass sämtliches Potential auch nur dann gehoben werden kann, wenn ein solches Tool von einer breiten Mehrheit der Anwender akzeptiert wird und sie sich damit identifizieren können. Vorbehalte bei einzelnen Personen, wie etwa dass ein System den Anwender ersetzen könnte, sollten dabei minimiert werden. Als besondere Herausforderung ist dabei zu berücksichtigen, dass in einigen Ländern die Mitarbeiter in der Verkehrszentrale hoch

²³⁴ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 153.

²³⁵ Vgl. EKOLLU/NARASIMHAN (2005), S. 5.

angesehene Mitarbeiter sind, in anderen Ländern wiederum haben sie nur die Stellung als unterstützendes Team und deshalb geringe Bedeutung.²³⁶ Dies kann schnell zur Folge haben, dass Mitarbeiter möglicherweise Angst um den Verlust ihres Arbeitsplatzes bekommen, da sie durch ein System ersetzt werden könnten.

Da ohne ein Training der Anwender solche Systeme in der Praxis oft zum Scheitern verurteilt sind, müssen Schulungen durchgeführt werden.²³⁷ Insbesondere die Fähigkeiten der Mitarbeiter müssen auf ein solches Tool abgestimmt werden. Ansonsten besteht ein Risiko, dass die Anwender das System gemäß dem Motto „A fool with a tool is still a fool“ nicht benutzen. Schon 1997 wurde angemerkt, dass wenig Forschung betrieben wird, wie solche Entscheidungssysteme mit der reichhaltigen Erfahrung der Verkehrsleiter kombinierbar sind und deren Entscheidungen ergänzen bzw. unterstützen können.²³⁸

Anforderung 42. *Die Anwender müssen vor Einführung des Tools ein umfangreiches Training absolvieren. Dazu müssen entsprechende Trainingskonzepte und Unterlagen erarbeitet werden.*

Im Rahmen dieser Trainings muss zum einen die Funktionalität und Bedienung der Anwendung geschult werden, zum anderen müssen die Anwender auch die Fähigkeit für das Analysieren und Bewerten von Lösungsvorschlägen des Systems erlernen. Da Mitarbeiter in der Verkehrsleitung meist keine fachlichen Optimierungsspezialisten sind, müssen sie in die Lage versetzt werden, um zu verstehen, wie ein System eine solche Lösung generiert und unter welchen Bedingungen es arbeitet. Dies ist insbesondere notwendig, damit der Anwender auch das System nutzen kann, falls ein Störungstyp auftritt, mit dem er bisher noch nicht konfrontiert war.

Anforderung 43. *Die Implementierung von Funktionen sollte iterativ erfolgen. Einfache Anwendungsfälle bzw. Teilfunktionalität sollten dabei zuerst implementiert werden.*

Damit die Anwender in das Tool Vertrauen fassen, sollten idealerweise zuerst die in Abschnitt 3.1 vorgestellten Anwendungsfälle zur Optimierung eingeführt werden, bevor es auch in Störsituationen unterstützt. Da erstere bereits tägliche Aufgaben sind, kann das System bereits regelmäßig eingesetzt werden. So haben die Anwender bereits Vertrauen, um das System in seltenen, ad-hoc vorkommenden Störungsfällen dann auch zu benutzen.

²³⁶ Vgl. PAZOUREK/VÁCLAVÍK (2017), S. 48.

²³⁷ Vgl. ANDERSSON (1989), S. 9.

²³⁸ CLARKE (1998b), S. 71.

3.3.4.2 Kalibrierung und Wartung

Vor Einführung sollte ein System umfangreich für alle relevanten Anwendungsfälle für verschiedene Szenarien unterschiedlicher Größe und Komplexität getestet werden, um sicherzustellen, dass es für den vorgesehenen Einsatz auch tatsächlich valide Ergebnisse liefert.²³⁹

Anforderung 44. *Systeme müssen bei Einführung zusammen mit den Anwendern umfangreich „einkalibriert“ werden.*

Um ein entsprechendes System einzustellen, werden in der Regel mehrere Workshops mit den Anwendern veranstaltet. Im Rahmen der Kalibrierung sollte dabei folgendes Vorgehen verwendet werden:

1. Es wird für einen Anwendungsfall eine fiktive Problemstellung im Testsystem erzeugt.
2. Anwender generiert eine Referenzlösung ohne Einsatz des Systems.
3. System rechnet eine weitere Lösung.
4. Die beiden Lösungen werden verglichen und Unterschiede identifiziert.
5. Entweder die Parameter des Systems werden angepasst, um dessen Lösungsvorschlag zu verbessern und/oder manuelle Lösung wird korrigiert.
6. Die vorherigen beiden Schritte werden solange durchgeführt, bis beide Lösungen annähernd identisch sind.

An dieser Stelle sollte nochmals hervorgehoben werden, dass im Rahmen der Kalibrierung immer das Prinzip „Mensch mit Maschine“ verfolgt werden muss und nicht „Mensch gegen Maschine“.

Es sollte auch klar sein, dass nach fertiger Implementierung kontinuierlicher Wartungsaufwand am System anfällt. Ändert sich beispielsweise die Struktur des Flugplans, wie es in der Regel zwischen Sommer- und Winterflugplan geschieht, oder werden neue Flugzeugtypen eingeführt, muss gerade für die selten auftretenden Anwendungsfälle regelmäßig überprüft werden, ob die hinterlegten Zielparameter und Einstellungen noch akzeptable Lösungen liefern.

Anforderung 45. *Systeme müssen im Rahmen der regelmäßigen Wartung „nachkalibriert“ werden.*

3.4 Wirtschaftlichkeit

In erster Linie sollte der Einsatz einer Entscheidungsunterstützung die Effizienz der Fluggesellschaft steigern. Insbesondere die wirtschaftliche Effizienz ist für die jeweiligen Entscheidungsträger inzwischen von zentraler Bedeutung.

²³⁹ Vgl. KALLRATH (2013), S. 51.

Dabei gibt es zwei Möglichkeiten, durch welche diese verbessert werden kann:²⁴⁰

- Es können durch eine umfangreiche Verarbeitung und Gewichtung der Informationen „bessere“ Entscheidungen getroffen werden, so dass beispielsweise weniger Flüge gestrichen oder verspätet werden, Passagiere günstiger umgebucht werden können oder die Crews weniger Überstunden leisten müssen.
- Es können schneller Entscheidungen getroffen werden, um so flexibler reagieren zu können. Denn je näher die Durchführung eines Fluges heranrückt, desto teurer sind in der Regel die Entscheidungen in der Umsetzung.

Darüber hinaus kann die Arbeitsbelastung in der Verkehrszentrale zu Spitzenzeiten reduziert werden und es könnten einheitlichere Entscheidungen getroffen werden.

Oft ist schwierig festzustellen, welche finanziellen Schäden operationale Abweichungen und Störungen verursachen.²⁴¹ Beispielsweise kosteten 15 Minuten Verspätungen am Gate für ein Flugzeug vom Typ Boeing 737-800 durchschnittlich 440 EUR.²⁴² Schon für eine kleinere Fluggesellschaft mit 24 Flugzeugen, wie etwa die Germania Fluggesellschaft mbH²⁴³, würde, wenn sie im Schnitt jeden Tag 2 Minuten pro Flugzeug am Gate einsparen könnten, im Jahr also ein Potential von $\frac{24 \cdot 2}{15} \cdot 440 \cdot 365 \approx 515.000$ EUR ergeben. Dies entspricht etwa 1% des Umsatzes aus dem Jahr 2015.²⁴⁴ Ob ein effizientes Störungsmanagement auch spürbare, langfristige Verbesserung der Loyalität von Passagieren mit sich bringt, wird allerdings ein kaum messbarer Faktor bleiben.²⁴⁵

Im Prinzip muss jede Fluggesellschaft die Wirtschaftlichkeit für sich selbst berechnen. Schließlich sind die zu unterstützenden Anwendungsfälle und deren Häufigkeit sowie die Entscheidungsprozesse maßgebliche Einflussfaktoren auf die Kalkulation. So zeigen die Beispielrechnungen aus Abschnitt 3.2.2 neben einem großen Potential auch eine ebenso große Schwankung. Hätte die Lufthansa ein Entscheidungsunterstützungssystem für den Anwendungsfall 4 betrieben, so hätte es sich im Jahr 2015 durch die Piloten, welche insgesamt 13 Mal ihre Arbeit niederlegten, sicherlich besser amortisiert als in 2014 mit nur 3 Arbeitsniederlegungen.²⁴⁶ Auch muss mit vielen Annahmen gerechnet werden, wenn etwa die Einsparungen aus einer verbesserten Pünktlichkeit abgeleitet werden. Bei einer Fluggesellschaft mit vielen umsteigenden Passagieren muss eine verbesserte Abflugpünktlichkeit beispielsweise nicht unbedingt die Kosten für Passagierumbuchungen senken, da durch die pünktlicheren Abflüge mehr Gäste von verspäteten Ankünften ihren Anschluss verpassen.

²⁴⁰ Vgl. GROTHLAGS (2009), S. 26.

²⁴¹ Vgl. HORTON/MURTHY (2000), S. 239.

²⁴² Vgl. COOK/TANNER (2011), S. 8.

²⁴³ Vgl. <https://www.flygermania.com/de-de/unternehmen/flotte/> (Stand: 17.03.2018).

²⁴⁴ Jahresumsatz von 424.544.497,23 EUR aus dem Bundesanzeiger unter <https://www.bundesanzeiger.de> abgerufen am 17.03.2018.

²⁴⁵ Vgl. RAPAJIC (2009), S. 15.

²⁴⁶ Vgl. WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT BEIM BUNDESMINISTER FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (2016), S. 2.

Es sei an dieser Stelle auch vor der Gefahr gewarnt, dass die Handlungsvorgaben des unternehmerischen Managements bereits derart restriktiv für das Personal ausfallen könnte, dass ein System kein zusätzliches Potential ermöglichen kann. Beispielsweise können Vorgaben aus dem Krisenstab im Falle eines Streiks bereits so restriktiv sein, dass dessen Vorschlag seitens der Verkehrszentrale nur noch umgesetzt werden muss.

Auch können für die technische Realisierung, Kalibrierung, Training und Wartung und Betrieb größere Kosten anfallen, welche gegen die möglichen Ersparnisse gerechnet werden müssen.

3.5 Zusammenfassung

Auch wenn sich eine Reihe von potentiellen Anwendungsfällen ableiten lassen, werden diese durch die Literatur nur unzureichend adressiert. Zudem sind die entwickelten Modelle meist zu wenig generalisiert bzw. zu stark fokussiert und wenig zielgerichtet entwickelt. Durch die in der vorliegenden Arbeit systematisch abgeleiteten Beschreibungen der Anwendungsfälle und Anforderungen können erstmals die entwickelten Modelle und Algorithmen genauer auf den Prüfstand für die praktische Anwendung gestellt werden. Denn die Absenz dieses allgemeingültigen Anforderungskatalogs ist mitunter die Hauptursache, warum die Systeme so weit von der Anwendung in der Praxis entfernt sind.

Im Prinzip liegt die wohl größte Herausforderung darin, die benötigten Funktionalitäten durch ein geeignetes Modell abzubilden und einen Algorithmus zu wählen, der in den vorgegebenen Zeiten auch komplexe Modelle lösen kann. Dabei sollte möglichst viel Flexibilität vorhanden sein, um sich den unterschiedlichen Bedürfnissen der verschiedenen Fluggesellschaften anpassen zu können.

4 Modelle und Algorithmen: Methodisches Fundament

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, haben die Beiträge der Forschung im Bereich der Entscheidungsunterstützung in der Verkehrszentrale eine heterogene Landschaft von Modellen und Algorithmen erschaffen. Daher stellt sich unweigerlich die Frage, warum sich dargestellte Modelle oder Algorithmen nicht etabliert haben. Schließlich beschäftigt sich die Disziplin des Operations Research überwiegend mit solchen Fragestellungen.

„Operations Research bezeichnet einen Wissenszweig, der sich mit der Analyse von praxisnahen, komplexen Problemstellungen im Rahmen eines Planungsprozesses zum Zweck der Vorbereitung von möglichst guten Entscheidungen durch die Anwendung mathematischer Methoden beschäftigt.“²⁴⁷

Die Hauptaufgabe ist es also, ein Entscheidungsproblem durch ein mathematisches Problem abzubilden, dieses mittels eines Algorithmus zu lösen und schlussendlich die mathematische Lösung wieder in eine tragfähige Entscheidung zu übersetzen. Abbildung 4.1 illustriert dieses Vorgehen nochmals grafisch.

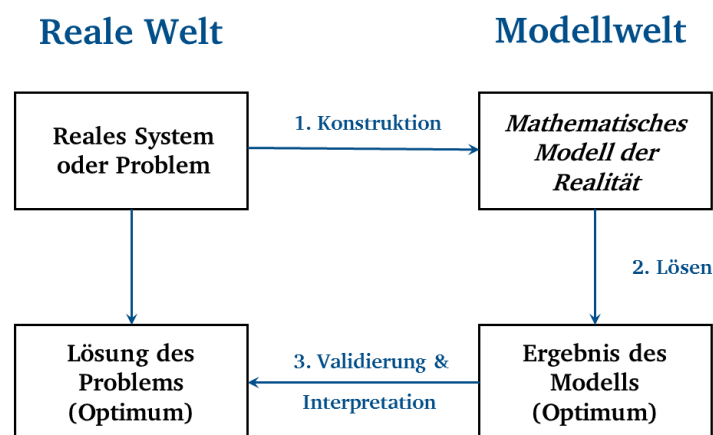


Abbildung 4.1: Phasenmodell für das Vorgehen in der OR-Forschung [Quelle: CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 43, Übersetzung durch den Verfasser]

Je nach Problemstellung können verschiedene Modelle aus der OR-Forschung zur Abbildung der Realität benutzt werden. Diese lassen sich in die verschiedenen Kategorien Optimierung, Spieltheorie, Warteschlangentheorie, Graphentheorie und Netzplantechnik sowie Simulation unterteilen.

Letztlich eignen sich jedoch überwiegend nur Optimierungsmodelle, welche im Kontext der Entscheidungsunterstützung in der Verkehrszentrale zum Einsatz kommen können, da es sich bei

²⁴⁷ DOMSCHKE et al. (2015), S. 1.

den übrigen Modellkategorien im Kern um erklärende Ansätze handelt. Dabei unterteilen sich Optimierungsmodelle in folgende mathematische Klassen:

- Lineare Programmierung
- Ganzzahlige (lineare) Programmierung
- Gemischt-Ganzzahlige (lineare) Programmierung
- Quadratische und Nichtlineare Optimierung
- Dynamische Programmierung

Der Hauptgrund für die heterogene Methodenlandschaft im Bereich der Entscheidungsunterstützung in der Verkehrszentrale liegt wohl in den fehlenden oder unklaren Anforderungen, welche die vorliegende Arbeit in Kapitel 3 zunächst umfangreich aufgearbeitet hat. Insbesondere die Anforderungen aus dem Abschnitt 3.3.2.2 wirken dabei stark limitierend auf die Auswahl eines praktikablen Modells und Algorithmus. Als einzig heute etablierte Methodik kommt im Grunde nur die ganzzahlige Optimierung in Kombination mit einem exakten Algorithmus in Frage, da sich diese bereits auf einem ausgereiften Stand der Technik befindet und die notwendige Flexibilität besitzt. Viele Beiträge bauen zwar bereits auf ganzzahliger Optimierung auf, oft werden aber auf Basis falscher Annahmen nicht geeignete Modelle konstruiert, welche dann zum Teil durch hoch-komplexe, nicht-standardisierte Algorithmen gelöst werden sollen.

Um die existierenden Modelle und Algorithmen im zweiten Abschnitt des Kapitels genauer bewerten zu können, muss im ersten Schritt das notwendige Werkzeug und die entsprechende Theorie zum Modellieren und Lösen von ganzzahliger Optimierungsmodelle dargestellt werden. Diese Ausführungen sind auch notwendig, um später die Parameter für den Lösungsalgorithmus geschickt anpassen zu können.

4.1 Lineare ganzzahlige Optimierung (IP)

Lineare und ganzzahlige Optimierung werden oft als Grundlage für Entscheidungsunterstützungssysteme verwendet.²⁴⁸ Wie bereits erwähnt, ist die Theorie und Praxis von ganzzahliger Optimierung bereits hinreichend gut erforscht worden.

Dieser Abschnitt baut daher auf den Standardwerken „Einführung in Operations Research“ von DOMSCHKE et al. (2015), „Applied Integer Programming“ von CHEN/BATSON/DANG (2010) sowie „Integer and Combinatorial Optimization Programming“ von NEMHAUSER/WOLSEY (1999) auf.

In den folgenden Abschnitten sollen zuerst Werkzeuge zur Modellierung vorgestellt werden, um dann folglich die Vor- und Nachteile verschiedener Lösungsalgorithmen zu diskutieren. Zusätzlich werden verfügbare Softwarebibliotheken zum Modellieren und Lösen vorgestellt, da diese meist einen Teil der Implementierung eines Entscheidungsunterstützungssystems darstellen.

²⁴⁸ Vgl. POWER/SHARDA (2007), S. 1047.

Zum Schluss sollen die für die vorliegende Arbeit relevanten OR-Modellklassen und deren grundlegende Komplexität dargestellt werden.

4.1.1 Modellierung durch IPs

Um später ein Optimierungsproblem zu modellieren, müssen zuerst die benötigten grundlegenden mathematischen Werkzeuge eingeführt werden, um damit Handlungs- und Entscheidungsmöglichkeiten sowie Ziel- und Rahmenvorgaben zu beschreiben. Darüber hinaus werden Techniken vorgestellt, damit aufgestellte Modellformulierungen systematisch verbessert werden können.

4.1.1.1 Notation und Definition

Es sei $\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$ die Menge der natürlichen Zahlen ohne 0, $\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$ die Menge der ganzen Zahlen und \mathbb{R} die Menge aller reellen Zahlen mit $\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{R}$. Hochgestellte + oder – werden für entsprechende Untermengen aller positiver bzw. negativer Zahlen verwendet, eine unten angestellte 0 inkludiert dabei die 0, die weder positiv noch negativ ist. Somit ist beispielsweise \mathbb{R}_0^+ die Menge aller positiven reellen Zahlen inklusive 0. Ist M eine Menge, so wird mit $|M|$ die Mächtigkeit bzw. Anzahl der Elemente dieser Menge beschrieben.

Eine Konstante bezeichnet einen bekannten Wert aus einer Menge, während eine Variable einen unbekannten Wert aus einer Menge symbolisiert, welcher erst noch durch eine Berechnung bestimmt werden muss. Ferner tragen Konstanten und Variablen den Zusatz reell, ganzzahlig oder binär, falls sie aus der Menge \mathbb{R} , \mathbb{Z} bzw. $\{0, 1\}$ entstammen.

Variablen dienen im Allgemeinen dazu, Handlungs- und Entscheidungsmöglichkeiten abzubilden. Die entsprechende Modellierung wird später noch in Abschnitt 4.1.1 genauer ausgeführt. Konstanten wiederum dienen zum einen für die Modellierung von Nebenbedingungen, zum anderen stellen sie Parameter der Zielfunktion dar.

Zur kompakten und formalen Notation werden nun einige Objekte aus der Linearen Algebra eingeführt.

Definition 1. Ein (reeller) Vektor b mit $n \in \mathbb{N}$ Einträgen ist definiert als

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n$$

und wird auch als Spaltenvektor der Dimension n bezeichnet.

Analog dazu heißt $b \in \mathbb{Z}^n$ ein ganzzahliger Vektor. Mit b^T wird der zugehörige Zeilenvektor gekennzeichnet. Vektoren gleicher Dimension können komponentenweise addiert sowie mit einer reellen Konstante multipliziert werden. Auch die Vergleichsoperatoren $=$, \leq und \geq sind für zwei Vektoren jeweils komponentenweise definiert.

Definition 2. Eine (reelle) Matrix A mit $m \in \mathbb{N}$ Zeilen und $n \in \mathbb{N}$ Spalten ist eine schematische Anordnung definiert als

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \cdots & a_{m,n} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n}$$

und wird auch kurz als Matrix der Dimension $m \times n$ bezeichnet.

Die einzelnen $a_{i,j}$ werden dabei als Komponenten der Matrix bezeichnet. Für eine Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ist $A^T \in \mathbb{R}^{n \times m}$ die transponierte Matrix, die durch Vertauschen von Spalten zu Zeilen entsteht. Genau genommen handelt es sich bei einem Vektor nach Definition 2 sogar um eine $n \times 1$ -Matrix.

Definition 3. Seien $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ und $x \in \mathbb{R}^n$. Dann wird mit

$$A \cdot x = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n a_{1,j} x_j \\ \sum_{j=1}^n a_{2,j} x_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n a_{m,j} x_j \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^m$$

das Matrix-Vektor-Produkt bezeichnet. Es wird oft auch kurz nur Ax geschrieben.

Per Definition ist das Ergebnis also ein Vektor aus dem \mathbb{R}^m . Wenn zwei Vektoren aus dem \mathbb{R}^n als Matrix mit einer Spalte gefasst werden, so ergibt das Matrix-Vektor-Produkt $x^T y$ oder $y^T x$ dann eine 1×1 Matrix bzw. eine reelle Zahl.

Definition 4. Sei $a \in \mathbb{R}^n$ ein Vektor von Konstanten, $b \in \mathbb{R}$ eine Konstante und $x \in \mathbb{R}^n$ ein Vektor mit Variablen. Dann wird mit

$$a^T x \leq b$$

eine lineare Nebenbedingung in Form einer Ungleichung beschrieben.

Alternativ kann auch die Darstellung $\sum_{i=1}^n a_i x_i \leq b$ genutzt werden.

Nach Definition 3 und mit dem komponentenweisen Vergleich können mit Hilfe des Matrix-Vektor-Produktes eine Sammlung von m Linearen Ungleichungen über n Variablen

$$\begin{array}{cccccc} a_{1,1}x_1 & + & a_{1,2}x_2 & + & \cdots & + & a_{1,n}x_n & \leq & b_1 \\ a_{2,1}x_1 & + & a_{2,2}x_2 & + & \cdots & + & a_{2,n}x_n & \leq & b_2 \\ \vdots & & \vdots & & \ddots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m,1}x_1 & + & a_{m,2}x_2 & + & \cdots & + & a_{m,n}x_n & \leq & b_m \end{array}$$

nun als $Ax \leq b$ mit $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$ und variablem $x \in \mathbb{R}^n$ dargestellt werden. Dies führt uns nun schlussendlich zur Definition eines ganzzahligen (linearen) Programms.

Definition 5. Seien $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^m$ und $c \in \mathbb{R}^n$. Dann heißt folgendes Maximierungsproblem

$$\max_{x \in \mathbb{Z}^n} \{c^T x : Ax \leq b\}$$

ein ganzzahliges (lineares) Programm oder auch kurz IP (aus dem Englischen für „Integer Programming“).

Dabei stellen die Komponenten von x die n Variablen dar. Mit dem Ausdruck $Ax \leq b$ werden die m Nebenbedingungen beschrieben. $x \rightarrow c^T x$ repräsentiert die Zielfunktion. Eine Variable x_i heißt dabei Schlupfvariable, wenn die zugehörige Komponente c_i in der Zielfunktion gleich 0 ist. Falls alle $c_i = 0$ sind, so handelt es sich um ein reines Zulässigkeitsproblem. Sind alle $a_{i,j} = 0$ und $b \geq 0$, so ist das Problem automatisch unbeschränkt. In beiden Fällen wird das Problem als degeneriert bezeichnet.

Genau genommen handelt es sich bei Definition 5 um eine Standardversion eines ganzzahligen Programms in Form eines Maximierungsproblems mit kleiner gleich Nebenbedingungen. Es gibt noch weitere Standardversionen in der Literatur, die sich aber ineinander überführen lassen.

Im nächsten Abschnitt wird nun aufgezeigt, wie die eingeführten Notation genutzt werden, um reale Zusammenhänge in mathematische Beschreibungen zu überführen.

4.1.1.2 Modellieren von Entitäten

Um Handlungs- und Entscheidungsmöglichkeiten zu modellieren, werden in den meisten Fällen binäre Variablen genutzt, um beispielsweise Ja-Nein Entscheidungen zu formulieren.

$$x = \begin{cases} 1 & \text{falls ja} \\ 0 & \text{falls nein} \end{cases}$$

Ein Beispiel dafür ist etwa die Entscheidung, ob ein Pairing einer Crew zugeordnet werden soll (Ja-Entscheidung) oder nicht (Nein-Entscheidung).

Daneben kommen häufig auch positiv ganzzahlige Variablen zum Einsatz. Mit diesen werden zum Beispiel die Anzahl der umzubuchenden Passagiere beschrieben. Diese lassen sich als ganzzahlige Variable $z \in \mathbb{Z}$ mit der Nebenbedingung $z \geq 0$ abbilden.

Öfters muss auch auf eine Kombination von Variablen und sogenannten künstlichen Nebenbedingungen zurückgegriffen werden. Diese Nebenbedingungen haben in der echten Welt keine direkte Bedeutung, sondern dienen nur der Abbildung eines künstlich notwendigen Zusammenhangs innerhalb des Modells. Dies ist beispielsweise bei diskreten ganzzahligen Variablen der Fall, bei denen $x \in D = \{d_1, \dots, d_k\} \subset \mathbb{Z}$ aus einer Menge mit k Elementen aus den ganzen Zahlen entstammt. Dies lässt sich anhand von k binären Variablen modellieren, die die Selektion des k -ten Elements aus D repräsentieren, sowie den folgenden beiden Nebenbedingungen $x = d_1 z_1 + d_2 z_2 + \dots + d_k z_k$ mit $z_1 + z_2 + \dots + z_k = 1$.

Diesen Handlungs- und Entscheidungsmöglichkeiten unterliegen in den meisten Fällen Rahmenvorgaben oder Nebenbedingungen. Oft treten diese in Form von logischen Ausdrücken auf, z.B. dass entweder Option A oder Option B gewählt werden muss. Für binäre Variablen gilt daher:

- A oder B: $x_A + x_B \geq 1$
- A und B: $x_A + x_B = 2$
- Entweder A oder B (exklusives Oder): $x_A + x_B = 1$
- A impliziert B: $x_A \leq x_B$

Wenn mit dem Ergebnis eines logischen Zusammenhangs weitergearbeitet werden muss, kommen folgende Nebenbedingungen zum Einsatz:

- C = A und B: $x_C \leq x_A, x_C \leq x_B$ und $x_C \geq x_A + x_B - 1$
- C = A oder B: $x_A \leq x_C, x_B \leq x_C$ und $x_C \leq x_A + x_B$
- C = Entweder A oder B: $x_C = x_A + x_B$

Diese Ergebnisse lassen sich natürlich weiterhin auf beliebige Anzahl von Optionen erweitern.

Ein weiterer wichtiger Modellierungsbaustein stellt eine sogenannte „Big M“-Methode dar. Ein „Big M“ beschreibt eine hinreichend große, probleminstanzspezifische Zahl $M \in \mathbb{Z}$. Mit dieser Methode können Nebenbedingungen abgebildet werden, bei der eine vorgelagerte Entscheidung einen nächsten Schritt erst möglich macht. Beispielsweise können Crews einem Flug nur dann zugeordnet werden, wenn der Flug nicht gestrichen ist. Seien x_i die binären Variablen, ob die Crew i dem Flug zugeordnet wird und y die binäre Variable, ob der Flug gestrichen ist. Dann gilt $\sum x_i \leq M * (1 - y)$, wobei M gerade mindestens so groß wie die Gesamtzahl möglicher Crews ist, die dem Flug zugeordnet werden können. Idealerweise ist das M so groß wie nötig und so klein wie möglich gewählt.

Für ganzzahlige Variablen x, y und z sind oft auch folgende Funktionen von Interesse:

- $z = \max\{x, y\}$: Definiere $w \in \{0, 1\}$ und finde jeweils zwei problemspezifische „Big M“ $M_x, M_y \in \mathbb{Z}$ mit:
 1. $x \leq M_x$ und $y \leq M_y$
 2. $x \leq z$ und $y \leq z$
 3. $z \leq x + M_y w$ und $z \leq y + M_x(1 - w)$
- $z = \min\{x, y\} = -\max\{-x, -y\}$
- $z = |x|$: Definiere $x_p, x_n \in \mathbb{Z}$ (Positivteil und Negativteil) mit:
 1. $z = x_p + x_n$
 2. $x = x_p - x_n$
 3. $0 \leq x_p \leq x$ und $0 \leq x_n \leq x$

Wie zu erkennen, wird für die max-Funktion die „Big M“-Methode verwendet.

Regelmäßig sind Restriktionen gar nicht absolut fix, so dass sie gegen zusätzliche Kosten oder einen Strafwert gebrochen werden können. Trotzdem soll aber der „Verstoß“ meist minimiert werden. Beispielsweise können einer Crew in ihrer Arbeitszeit nur maximal n Flüge zugeordnet werden, Extra-Jobs können bei entsprechenden Überstunden mit Zusatzkosten m zur Not durchgeführt werden. Dazu führt man in diesem Fall eine Variable $z \in \mathbb{Z}$ mit $z \geq 0$ zum Kennzeichen der Überstunden in der Nebenbedingung $\sum x_i \leq n + z$ ein und erweitert die minimierende Zielfunktion auf $c^T x + mz$.

Falls $<$ oder $>$ Nebenbedingungen vorliegen, so müssen diese aus numerischen Aspekten sorgfältig abgebildet werden, denn im Rahmen von IPs sind nur \leq und \geq (bzw. $=$) erlaubt. Beispielsweise könnte gefordert sein, dass etwas < 5 ist. Dazu wird ein kleines, aber festes $\varepsilon > 0$, etwa $\varepsilon = 10^{-5}$ definiert und dann $\leq 5 - \varepsilon$ modelliert. Das problemspezifische ε ist dabei (analog der „Big M“-Methode) so gewählt, dass mit der resultierenden Ungenauigkeit in der realen Welt gearbeitet werden kann.

Schlussendlich müssen noch Zielvorgaben modelliert werden. Dies geschieht analog der Definition einer Zielfunktion als Summe von Variablen multipliziert mit Konstanten, welche die jeweiligen Kosten, Gewinne oder einfach abstrakte Straf- oder Bonuswerte repräsentieren. Dazu muss auch festgelegt werden, ob das Ziel maximiert oder minimiert werden soll.

Regelmäßig tritt hier die Herausforderung auf, dass etwa Kosten nicht komplett linear ansteigen, sondern nur stückweise linear sind. Seien beispielsweise die Kosten für Verspätungen von Flügen Teil einer zu minimierenden Zielfunktion. Von 0 bis n Minuten entstehen Kosten in Höhe von u pro Minute (Intervall 1), zwischen $n + 1$ und m Minuten v (Intervall 2) und ab $m + 1$ Minuten bis zum Maximum von M Kosten von w (Intervall 3). Sei $x \in \mathbb{Z}_0^+$ die Verspätung in Minuten und

mit $x_i \in \mathbb{Z}_0^+$ die Verspätungen im Intervall $i = 1, 2, 3$ definiert. Dann werden folgende binäre Variablen zur Selektion des Intervalls eingesetzt:

$$z_i = \begin{cases} 1 & \text{Falls } x_i \text{ an der oberen Grenze zu Intervall } i \text{ liegt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad i = 1, 2$$

Die Zielfunktion wird auf

$$\min ux_1 + vx_2 + wx_3 + \dots$$

eingestellt und noch folgende Nebenbedingungen hinzugefügt:

- $x = x_1 + x_2 + x_3$
- $nz_1 \leq x_1 \leq n$
- $(m - (n + 1))z_2 \leq x_2 \leq (m - (n + 1))z_1$
- $0 \leq x_3 \leq (M - (m + 1))z_2$

Im Folgenden soll schlussendlich noch kurz aufgezeigt werden, wie die Formulierungen aus diesem Abschnitt in die eingeführte Standardversion in Abschnitt 4.1.1.1 umformuliert werden können.

Zuerst sei immer davon auszugehen, dass alle Variablen auf die linke Seite der Ungleichung/Gleichung gebracht werden und auf der rechten Seite alle Konstanten zusammengefasst werden. Es seien weiterhin $a, c, x \in \mathbb{R}^n$, $b \in \mathbb{R}$ sowie $z \in \{0, 1\}$.

1. Falls die Zielfunktion $c^T x$ minimiert werden soll, kann durch Multiplikation mit -1 das Problem auf ein Maximierungsproblem zurückgeführt werden, also $(-c)^T x$.
2. Ist eine Nebenbedingung als $a^T x \geq b$ definiert, kann ebenfalls durch Multiplikation mit -1 das System auf kleiner gleich zurückgeführt werden, also $(-a)^T x \leq -b$.
3. Ist eine Nebenbedingung als $a^T x = b$ definiert, wird diese durch $a^T x \leq b$ und $a^T x \geq b$ (bzw. $(-a)^T x \leq -b$) ersetzt.
4. z lässt sich als ganzzahlige Variable $y \in \mathbb{Z}$ mit den zusätzlichen Nebenbedingungen $0 \leq y$ (bzw. $-y \leq 0$) und $y \leq 1$ abbilden.

Damit sind die wichtigsten Modellierungswerkzeuge, die später auch weitestgehend benutzt werden, eingeführt.

4.1.1.3 Verbesserung der Modellformulierung

Meistens gibt es mehrere oder gar beliebig viele Varianten, ein Problem mittels eines IPs zu beschreiben.²⁴⁹ Theoretisch gesehen macht das erstmal keinen Unterschied, beim Lösen in der Praxis können hingegen Formulierungen geschärft werden. Um dies zu erreichen, werden folgende Techniken eingesetzt:

- Skalierung der Parameter
- Straffen von Nebenbedingungen
- Eliminieren von redundanten Nebenbedingungen
- Fixierungen und Aggregation von Variablen
- Identifizierung von Unzulässigkeiten
- Zerlegung in unabhängige Teilprobleme

Diese Techniken funktionieren bei binären Variablen besonders gut, da hier die boolesche Algebra viele Möglichkeiten der Transformation bietet.²⁵⁰ Generell gilt dabei nicht unbedingt, dass die Problembeschreibung mit der kleinsten Anzahl von Variablen und Nebenbedingungen die beste Formulierung ist.

4.1.2 Lösen von IPs

Um ganzzahlige Optimierungsprobleme zu lösen, gibt es prinzipiell mehrer Algorithmen, welche zur Lösung in Frage kommen. Da die meisten davon auf dem Simplex-Verfahren zum Lösen von linearer Optimierung aufbauen, muss dazu zuerst die Beziehung zur linearen Optimierung aufgearbeitet werden, bevor der Simplex-Algorithmus erklärt wird.

Im Anschluss werden die drei möglichen Algorithmen für ganzzahlige Optimierung vorgestellt:

1. Branch-and-Bound
2. Schnittebenen-Verfahren
3. Branch-and-Cut (als Kombination von 1 und 2)

Zum Ende soll noch aufgezeigt werden, wie Heuristiken die oben genannten Verfahren ergänzen können und welche alternativen Lösungsalgorithmen, wie etwa Dekompositionsverfahren, noch existieren.

²⁴⁹ Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 79.

²⁵⁰ Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 86f.

4.1.2.1 Verbindung von linearer und ganzzahliger Optimierung

Um später ganzzahlige Optimierungsprobleme effizient lösen zu können, wird auf das Konzept der linearen Programmierung zurückgegriffen. Dabei bildet die lineare Optimierung ein eigenständiges Teilgebiet der Mathematik.

Definition 6. Ein lineares Programm oder auch kurz LP wird durch

$$\max_{x \in \mathbb{R}^n} \{c^T x : Ax \leq b\}$$

beschrieben.

Es handelt sich dabei quasi um ein IP, nur dass die Variablen reell sind. Das Konzept einer linearen Relaxierung verknüpft nun ein ganzzahliges mit einem linearen Optimierungsproblem.

Definition 7. Sei $\max_{x \in \mathbb{Z}^n} \{c^T x : Ax \leq b\}$ ein IP. Dann heißt

$$\max_{z \in \mathbb{R}^n} \{c^T z : Az \leq b\}$$

die lineare Relaxierung des IPs und wird als IP^* abgekürzt.

Bei der linearen Relaxierung werden quasi alle ganzzahligen Variablen als reelle Variablen betrachtet. Es handelt sich bei der Relaxierung also gemäß Definition 7 um ein lineares Programm. Es ist offensichtlich, dass jede Lösung des IPs auch eine Lösung seiner Relaxierung ist. Dieses kann daher auch die Feststellung der Unlösbarkeit eines ganzzahligen Problems liefern.

Definition 8. Sei $\max_{x \in \mathbb{Z}^n} \{c^T x : Ax \leq b\}$ ein IP. Dann heißt

- $\tilde{x} \in \mathbb{Z}^n$ eine zulässige Lösung, falls $A\tilde{x} \leq b$ ist.
- $\tilde{f} = c^T \tilde{x}$ der Zielfunktionswert der zulässigen Lösung $\tilde{x} \in \mathbb{Z}^n$
- $\hat{x} \in \mathbb{Z}^n$ eine optimale Lösung, falls \hat{x} eine zulässige Lösung ist und für alle zulässigen Lösungen $\tilde{x} \in \mathbb{Z}^n$ gilt, dass $c^T \hat{x} \geq c^T \tilde{x}$.

Der Zielfunktionswert einer optimalen Lösung heißt auch das Optimum. Ein ganzzahliges Programm heißt unlösbar, falls nach Definition 8 keine zulässige Lösung existiert. Unbeschränkt ist ein IP genau dann, wenn zwar mindestens eine zulässige Lösung existiert, jedoch keine optimale Lösung. Die Menge aller zulässigen Lösungen heißt auch Zulässigkeitsbereich.

Die folgende Satz beschreibt nun die zentralen Zusammenhänge zwischen einem IP und seiner linearen Relaxierung.

Satz 1. Sei $\max_{x \in \mathbb{Z}^n} \{c^T x : Ax \leq b\}$ ein IP

1. Ist die lineare Relaxierung eines IPs unlösbar, so ist auch das IP unlösbar.
2. Stimmen die Optima der beiden Probleme überein, so ist eine optimale Lösung für die Relaxierung automatisch auch eine optimale Lösung für das IP

Beweis. Siehe Proposition 2.3 in WOLSEY (1998). □

Das zweite wichtige Konzept stellen die dualen Programme dar.

Definition 9. Sei $\max_{x \in \mathbb{R}^n} \{c^T x : Ax \leq b\}$ ein LP. Dann heißt

$$\min_{y \in \mathbb{R}^m} \{b^T y : y^T A = c^T, y \geq 0\}$$

das duale Programm des LPs.

Das ursprüngliche LP wird auch als das primale Programm bezeichnet. Außerdem ist die Dualisierung des dualen Programms wieder das primale Programm. Veranschaulicht bedeutet das Programm in etwa, dass die Zielfunktion jetzt als Teil der Nebenbedingung funktioniert und der konstante Vektor der Nebenbedingung als neue Zielfunktion eingesetzt wird.

Der folgende Dualitätssatz gibt nun den wichtigsten Zusammenhang beider Probleme an.

Satz 2 (Starker Dualitätssatz). Sei $\max_{x \in \mathbb{R}^n} \{c^T x : Ax \leq b\}$ ein lineares Programm sowie $\min_{y \in \mathbb{R}^m} \{b^T y : y^T A = c^T, y \geq 0\}$ das dazugehörige duale Programm. Dann ist entweder

1. mindestens eines der beiden Programme unbeschränkt oder
2. die Zielfunktionswerte der jeweiligen optimalen Lösungen stimmen überein und es gilt somit $\max_{x \in \mathbb{R}^n} \{c^T x : Ax \leq b\} = \min_{y \in \mathbb{R}^m} \{b^T y : y^T A = c^T\}$.

Beweis. Siehe Korollar 7.1g in SCHRIJVER (2000). □

Dem Beweis kann übrigens entnommen werden, dass das duale Programm im Falle der Beschränktheit beider Probleme eine obere Schranke für die Zielfunktion bildet. Folglich bildet das duale Programm der linearen Relaxierung eines IP eine obere Schranke. Diese obere Schranke wird später für die Lösungsalgorithmen der ganzzahligen Optimierung noch von Relevanz sein.

Werden lineare und ganzzahlige Optimierung verknüpft, lässt also ganzzahlige und reelle Variablen zu, so spricht man übrigens von einer gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung, im englischen auch MIP (Mixed Integer Programming) oder MILP (Mixed Integer Linear Programming) genannt.

4.1.2.2 Simplex-Verfahren (LP)

Für IP-Algorithmen wird es nötig sein, LPs (welche meist aus den Relaxierungen entstehen) zu lösen. Auch wenn die theoretischen Grundlagen weit vor 1950 entwickelt wurden, zählt das Simplex-Verfahren nach wie vor zu den leistungsfähigsten Verfahren zum Lösen von LPs in der Praxis.

Im Prinzip arbeitet der Algorithmus auf einer geometrischen Repräsentation des Zulässigkeitsbereiches.

Definition 10. Die Menge aller Punkte $x_o \in \mathbb{R}^n$, welche eine Reihe von Ungleichungen $Ax_o \leq b$ erfüllen, werden auch als Polyeder mit $P = \{x_o \in \mathbb{R}^n : Ax_o \leq b\}$ bezeichnet.

Definition 11. Sei P ein Polyeder und $x \in P$. Der Punkt x ist genau dann eine Ecke des Polyeders, wenn er sich nicht als Konvexkombination von zwei anderen Punkten $y, z \in P$ des Polyeders darstellen lässt, also $x = \lambda y + (1 - \lambda)z$, $\lambda \in [0, 1] \implies x = y = z$ gilt.

Der folgende Satz zeigt nun die Verbindung zwischen Ecken und optimalen Lösungen.

Satz 3. Existiert ein globales Minimum für das LP, so gibt es mindestens eine Ecke, die eine optimale Lösung ist.

Beweis. Siehe Satz 2.2 und Bemerkung 2.3 in DOMSCHKE et al. (2015) □

Mit Algorithmus 1 wird der (primale) Simplex-Algorithmus mit Bland's Pivot-Regel beschrieben, wenn eine Startecke bereits bekannt ist.²⁵¹ Falls noch keine Startecke bekannt ist, kann diese einfach mit der Anwendung des Simplex-Algorithmus auf ein erweitertes, höherdimensionales Hilfsproblem, für dessen Problem eine Startecke bekannt ist, ermittelt werden, so dass dessen optimale Lösung eine zulässige Ecke für das Ursprungsproblem ist.²⁵²

Anschaulich gesprochen wandert der Simplex von Ecke zu Ecke bis eine optimale Ecke gefunden ist. Zur Darstellung werden die Schritte des Algorithmus meist an den sogenannten Simplex-Tableaus dargestellt. Damit dieses Verfahren für die Praxis effizient genutzt werden kann, sind neben Bland's Pivotregel ausgeklügelte Strategien entwickelt worden, mit der ideale Pivotelemente aus den Zeilen und Spalten bestimmt werden können.

Mittels eines modifizierten Einheitswürfels, dem sogenannten Klee-Minty-Würfel, kann die nicht-polynomielle Laufzeit des Algorithmus nachgewiesen werden, da der Simplex dort alle 2^n Ecken tatsächlich besucht. Trotzdem erweist sich der Simplex-Algorithmus im Mittel als einer der effizientesten Algorithmen zum Lösen von LPs. Besonders im Rahmen der im Folgenden beschriebenen Algorithmen wird dabei die leichte Abwandlung in Form des sogenannten dualen Simplex-Algorithmus verwendet, um schnell eine neue Lösung zu errechnen, falls zum ursprünglichen Problem sukzessiv neue Nebenbedingungen hinzugefügt werden.²⁵³

²⁵¹ Vgl. SCHRIJVER (2000), S. 129ff.

²⁵² Vgl. DOMSCHKE et al. (2015), S. 30ff.

²⁵³ Vgl. NEMHAUSER/WOLSEY (1999), S. 37.

Algorithmus 1 Simplex-Algorithmus mit bekannter Ecke.

```
1:  $\tilde{x} \leftarrow$  Eine bekannte Ecke.
2:  $\text{optimal} \leftarrow \text{False}$ 
3: Wähle eine Untermenge  $\tilde{A}x = \tilde{b}$  von  $Ax \leq b$  mit  $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{b}$  und  $\tilde{A}$  ist nicht-singulär.
4: while  $\text{optimal} \neq \text{True}$  do
5:   Bestimme  $u \in \mathbb{R}^m$  mit  $u^T \tilde{A} = c^T$ , wobei  $u_i = 0$  für alle Komponenten außerhalb  $\tilde{A}$ .
6:   Zur Bestimmung aller anderen  $u_j$  wird  $c^T \tilde{A}^{-1}$  berechnet.
7:   if  $u \geq 0$  then
8:     Dann ist  $\tilde{x}$  nach Satz 2 automatisch eine optimale Lösung.
9:      $\text{optimal} = \text{True}$  and go to Schritt 3
10:  else
11:    Wähle den kleinsten Index  $i^*$  mit  $u_{i^*} < 0$ .
12:    Dabei kann  $y$  der entsprechenden Spalte aus  $-\tilde{A}^{-1}$  entnommen werden.
13:    if  $a^T y \leq 0$  für jede Zeile von  $A$  then
14:      So ist das Problem nach Satz 2 automatisch unbeschränkt. go to Schritt 22
15:    else
16:      Seien  $J$  alle Indizes aller Zeilen mit  $a_j^T > 0$ . Bestimme:
17:       $\lambda_0 \leftarrow \min \left\{ \frac{\beta_i - a_j^T \tilde{x}}{a_j^T y} : j \in J \right\}$ 
18:      Sei  $j^*$  der kleinste Index, an dem das Minimum angenommen wird.
19:      Ersetze Zeile  $i^*$  mit Zeile  $j^*$  in  $\tilde{A}$  und setze  $\tilde{x} \leftarrow \tilde{x} + \lambda_0 y$ .
20:    end if
21:  end if
22: end while
```

4.1.2.3 Branch-and-Bound (IP)

In der Regel ist die vollständige Enumeration aller Lösungen – wenn überhaupt durchführbar – nahezu unpraktikabel. Deshalb wurden Verfahren entwickelt, die nur eine begrenzte Enumeration durchführen.²⁵⁴

Im Prinzip handelt es sich bei Branch-and-Bound um einen Teile und Herrsche Ansatz. Dabei wird ein Problem in mehrere Teilprobleme zerlegt. Diese werden dann separat gelöst und am Ende zusammengefügt, um so eine Lösung für das Gesamtproblem zu bilden. Im konkreten Fall werden Teilprobleme sukzessive immer weiter geteilt und modifiziert (Branching), so dass sich die optimale Lösung als Relaxierung eines der Teilprobleme ergibt. Dazu werden im Verlauf auch Teilprobleme wieder ausgeschlossen, in denen sich die optimale Lösung definitiv nicht befinden kann (Bounding).

²⁵⁴ Vgl. WOLSEY (1998), S. 91f.

Beim Branching werden folgende beiden Rundungsfunktionen von Bedeutung sein. Sei $x \in \mathbb{R}$. Die Abrundung $\lfloor x \rfloor$ ist definiert als $n \in \mathbb{Z}$ mit $n \leq x < n + 1$. Analog dazu ist die Aufrundung $\lceil x \rceil$ als $n \in \mathbb{Z}$ mit $n - 1 < x \leq n$ definiert.

Sei $\max_{x \in \mathbb{Z}^n} \{c^T x : Ax \leq b\}$ ein IP, dann ist der Branch-and-Bound Algorithmus in seiner Grundform wie folgt definiert:²⁵⁵

Algorithmus 2 Branch-and-Bound

```

1:  $N \leftarrow \{IP\}$ 
2:  $z_b \leftarrow -\infty$ 
3:  $x_{opt} \leftarrow NULL$ 
4: while  $N \neq \emptyset$  do
5:   Wähle ein  $N_i \in N$  und entferne dieses aus  $N$ .
6:   Berechne die Relaxierung  $N_i^*$  von  $N_i$ .
7:   if  $N_i^*$  ist unlösbar then
8:     go to Schritt 4
9:   else
10:     $x^* \leftarrow$  eine optimale Lösung von  $N_i^*$ 
11:     $z^* \leftarrow$  der Zielfunktionswert zu  $x^*$ 
12:    if  $z^* \leq z_b$  then
13:      go to Schritt 4
14:    else
15:      if  $x^*$  ist ganzzahlig then
16:         $z_b \leftarrow z^*, x_{opt} \leftarrow x^*$ 
17:      else
18:        Es existiert mindestens ein nicht-ganzzahliger Eintrag  $x_j^*$ .
19:         $L \leftarrow N_i \cup \{x_j \leq \lfloor x_j^* \rfloor\}$ 
20:         $U \leftarrow N_i \cup \{x_j \geq \lceil x_j^* \rceil\}$ 
21:         $N \leftarrow N \cup (L \cup U)$ 
22:      end if
23:    end if
24:  end if
25: end while

```

Am Ende des Algorithmus ist x^* dann eine gefundene Lösung. Dabei bezeichnet $|z_b - z^*|$ die sogenannte Optimalitätslücke oder Gap. Ist diese 0, so ist x^* eine optimale Lösung. Falls im ersten Schritt die Relaxierung des IPs bereits nicht lösbar ist, so hat das IP nach Satz 1 keine Lösung. Falls nach Durchlaufen keine ganzzahlige Lösung gefunden ist, so existiert ebenfalls keine ganzzahlige Lösung für das IP.

²⁵⁵ Vgl. WOLSEY (1998), S. 100.

Oft wird auch der konkrete Ablauf des Algorithmus in einem Baum dargestellt.²⁵⁶ Damit dieses Verfahren in der Praxis effizient genutzt werden kann, existieren ausgeklügelte Strategien, wie Teilprobleme idealerweise generiert und in welcher Reihenfolge diese bearbeitet werden.

4.1.2.4 Schnittebenen-Verfahren (IP)

Bei einem Schnittebenen-Verfahren wird im Gegensatz zum Branch-and-Bound versucht, das ursprüngliche Problem soweit zu modifizieren, dass bei Lösung der Relaxierung des Problems bereits eine optimale, ganzzahlige Lösung gefunden wird. Dazu wird in jedem Schritt mit einer Schnittebene (also einer zusätzlichen Nebenbedingung) versucht, die aktuelle nicht-ganzzahlige Lösung der Relaxierung „abzuschneiden“, ohne dabei eine zulässige ganzzahlige Lösung zu verlieren.

Das bekannteste Verfahren stellt das Schnittebenen-Verfahren nach Gomory dar, welches auf Basis des Simplex-Tableaus sogenannte Gomory-Chvatal Schnitte generiert.²⁵⁷

4.1.2.5 Branch-and-Cut (IP)

Das Branch-and-Cut Verfahren für ganzzahlige Optimierung ist im Prinzip ein Branch-and-Bound Verfahren, bei dem außerdem für jedes betrachtete Teilproblem mittels des Schnittebenen-Verfahrens zusätzliche Schnitte generiert werden. Es werden damit die Vorteile beider Ansätze kombiniert und zählt aktuell zu den effizientesten Verfahren zum Lösen von jedweden IPs.²⁵⁸

Insbesondere gibt es strukturspezifische sowie problemspezifische Schnittebenen für OR-Klassen (siehe späteren Abschnitt 4.1.4.2) wie etwa:

- Rundungsschnitte: Rundungsschnitte entstehen durch ganzzahlige Rundungen der Koeffizienten von ganzzahligen Variablen und der rechten Seiten einer Ungleichung.
- Überdeckungsschnitte: Falls Nebenbedingungen in Form einer sogenannten Knapsack-Nebenbedingung²⁵⁹ vorliegen, kann eine minimale Überdeckung dieser Nebenbedingung zugeordnet werden. Dabei ist die minimale Überdeckung eine Untermenge der Variablen einer Nebenbedingung, die die Nebenbedingung bei auf Eins Setzen aller Variablen verletzt, aber sobald nur eine Variable entfernt ist, die Nebenbedingung erfüllt wird.
- Cliques-Schnitte: Eine Clique ist eine Verbindung von einer Gruppe binärer Variablen, bei der höchstens eine Variable positiv in irgendeiner ganzzahligen zulässigen Lösung sein kann.

²⁵⁶ Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 272.

²⁵⁷ Vgl. SCHRIJVER (2000), S. 354ff.; WOLSEY (1998), S. 133ff.

²⁵⁸ Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 306.

²⁵⁹ Siehe dazu später noch Abschnitt 4.1.4.2 zur Erklärung des Knapsack-Problems.

4.1.2.6 Heuristiken für IPs

Die bisher vorgestellten Algorithmen stellen exakte Verfahren dar, die eine tatsächlich optimale Lösung finden. Manchmal reicht es aber auch aus, eine gute Lösung zu finden. Deshalb werden und wurden Heuristiken entwickelt, die, analog den speziellen Schnittebenen, unter gewissen Gegebenheiten gute Lösungen in kurzer Zeit generieren. Heuristiken versuchen in der Regel zuerst, eine zulässige Lösung zu finden oder ausgehend von einer trivialen Lösung diese unter Ausnutzung problemspezifischer Informationen dann schrittweise zu verbessern.²⁶⁰

Hierbei wird zwischen deterministischen Verfahren unterschieden, die bei mehrfacher Anwendung unter den gleichen Bedingungen exakt dasselbe Ergebnis produzieren, und stochastischen Verfahren, welche hingegen eine zufällige Komponente haben und daher unter gleichen Bedingungen in der Regel eine unterschiedliche Lösung liefern.²⁶¹

Allerdings gibt es nur eine überschaubare Anzahl von Heuristiken, mit denen sich beliebige IPs lösen lassen. In der Regel sind Heuristiken für OR-Klassen maßgefertigt und setzen das Öffnen nicht alleine auf der Modellbeschreibung als IP auf, sondern nutzen oft zusätzlich eine Repräsentation des Problems als Graph. Viele Heuristiken basieren auf einer Art Meta-Strategie, die sich an einer Art realem Prozess in der Natur (z.B. der Genetik) oder Technik (z.B. der Thermodynamik) orientieren.²⁶²

Der mit Abstand größte Nachteil der reinen Heuristiken ist, dass in der Regel keine Abschätzung der Güte einer (guten) gefundenen zulässigen Lösung existiert.²⁶³ In diesem Zusammenhang kann, falls eine Heuristik keine Lösung findet, auch nicht festgestellt werden, ob das Problem tatsächlich unlösbar ist oder nicht ausreichend intensiv gesucht wurde.

Heute werden Heuristiken daher bevorzugt in exakten Verfahren, wie etwa im Branch-and-Cut, eingebettet, um die Vorteile der verschiedenen Verfahren zu kombinieren. Diese Disziplin wird auch als „Matheuristics“ bezeichnet.²⁶⁴ Die Verfahren

- Local Branching,
- Relaxation Induced Neighborhood Search (RINS) und
- Feasibility Pump

gehören heute zu den bekanntesten Heuristiken und sind Teil kommerzieller Löser.²⁶⁵

²⁶⁰ Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 363.

²⁶¹ Vgl. DOMSCHKE et al. (2015), S. 136.

²⁶² Vgl. DOMSCHKE et al. (2015), S. 138ff.

²⁶³ Vgl. WOLSEY (1998), S. 204.

²⁶⁴ Vgl. CASERTA/VOSS (2009), S. 19.

²⁶⁵ Vgl. BERTHOLD (2014), S. 34.

4.1.2.7 Alternative Lösungsverfahren

Zum Lösen von linearen Programmen bieten sich auch die sogenannten Innere-Punkte-Verfahren oder Barriere-Methoden an. Im Gegensatz zum Simplex-Algorithmus aus Abschnitt 4.1.2.2 suchen diese, ausgehend von einer im Inneren des Polyeders liegenden Lösung, nach einer optimalen Lösung ohne sich dabei über die Ecken des Polyeders zu bewegen, wie in Abbildung 4.2 dargestellt.

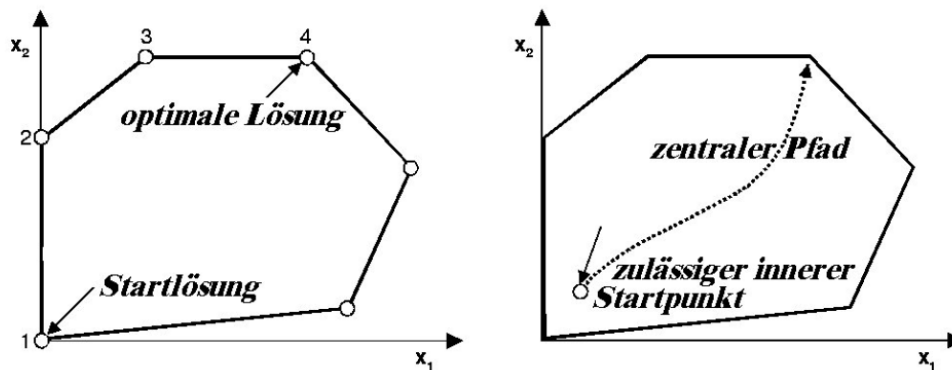


Abbildung 4.2: Graphische Darstellung des Simplex-Verfahrens (links) gegenüber Innere-Punkte-Verfahren (rechts) [Quelle: KALLRATH (2013), S. 72]

Zu den bekanntesten Vorgehensweisen dieser Art gehören die Ellipsoid-Methode von Khachiyan aus dem Jahr 1979 sowie die projektive Methode von Karmarkar aus 1984.²⁶⁶ Effiziente Implementierungen von Inneren-Punkte-Verfahren können dabei durchaus mit dem Simplex Algorithmus konkurrieren. Zudem dienen sie als Grundlage zum Nachweis der Lösbarkeit von LPs in polynomieller Laufzeit.

Eine weitere Ergänzung zum Lösen größerer linearer Optimierungsprobleme stellen die sogenannten Column-Generation-Verfahren dar. Die Idee von Column-Generation besteht darin, durch Entfernung von Teilen der Variablen aus dem Ursprungsproblem ein sogenanntes Masterproblem und ein Teilproblem bestehend aus den entfernten Variablen zu generieren. Diese werden dann iterativ gelöst und sukzessiv nur die „richtigen“ Variablen wieder in das Masterproblem eingefügt sowie die Zielfunktion des Subproblems adjustiert, bis bereits Optimalität vorzeitig nachgewiesen werden kann.

Diese Verfahren funktionieren dann besonders gut, falls ein Problem sehr viel mehr Variablen als Nebenbedingungen hat und optimale Lösungen in der Regel nur sehr wenige Werte $\neq 0$ haben. Das bekannteste dieser Verfahren heißt Dantzig-Wolfe-Dekomposition, bei dem versucht wird, möglichst disjunkte Subprobleme vom Ursprungsproblem abzulösen, die möglichst unabhängig voneinander gelöst werden können.²⁶⁷ Die Dantzig-Wolfe-Dekomposition funktioniert dann be-

²⁶⁶ Vgl. DOMSCHKE et al. (2015), S. 26.

²⁶⁷ Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 346ff.

sonders gut, wenn die Matrix der Nebenbedingungen eine möglichst diagonale Blockstruktur hat.

Auch im Bereich der Lösung von ganzzahliger Optimierung kann das Column-Generation Verfahren genutzt werden, um das Branch-and-Cut Verfahren für Optimierungsprobleme mit vielen Variablen effizienter zu machen. Dies bezeichnet dann den sogenannten Branch-and-Price-Algorithmus.²⁶⁸

4.1.3 Softwareunterstützung

Für das Vorgehen im OR ist Unterstützung von Software von zentraler Bedeutung, um die Modelle zu lösen. Da solche Problemstellungen meist im Kontext von Unternehmensprozessen entstehen, die bereits vollständig mittels computerisierter Systeme durchgeführt werden, bedarf es auch zur Lösung der mathematischen Modelle entsprechende Softwareunterstützung. Daher haben sich mittlerweile mehrere Anbieter im Bereich von kommerziellen IP-Lösern etabliert, die insbesondere das in Abschnitt 4.1.2.5 vorgestellte Branch-and-Cut Verfahren sowie einige weitere Methoden aus Abschnitt 4.1.2 implementieren, allerdings keine der vorgestellten Column-Generation-Ansätze. Zu den derzeitigen Marktführern gehören:

- IBM ILOG CPLEX (<http://www.ibm.com>)
- Gurobi (<http://www.gurobi.com>)
- FICO XPress (<http://www.fico.com>)

Viele der oben aufgeführten Bibliotheken bieten einige Zusatzfeatures wie multikriterielle Optimierung (mehrere Zielfunktionen) und auch zum Teil nicht-lineare Optimierung. IBM und FICO bieten darüber hinaus auch ganze Optimierungssuiten mit separater Entwicklungsumgebung an. Weiterhin gibt es auch Suiten, welche eigene umfangreiche Modellierungssprachen für verschiedene mathematische Modellen besitzen, jedoch keine eigenen Solver mitliefern, sondern nur externe Solver anbinden:

- GAMS (<http://www.gams.com/>)
- AMPL (<http://ampl.com/>)
- AIMMS (<http://aimms.com/>)
- LINGO (<http://www.lindo.com>)

Es gibt auch offene Formate wie .LP und .MPS zur Modellbeschreibung, die von fast allen Bibliotheken verarbeitet werden können.²⁶⁹ Im akademischen Bereich sind viele der oben beschriebenen Tools meist uneingeschränkt und kostenlos nutzbar, ansonsten gibt es verschiedene Lizenzmodelle für den kommerziellen Einsatz. Alternativ gibt es einige erwähnenswerte Alternativen von Open-Source Solvern:

²⁶⁸ Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 334f.

²⁶⁹ Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 387.

-
- CBC (<http://projects.coin-or.org/Cbc>)
 - GLPK (<http://www.gnu.org/software/glpk/>)
 - SCIP (<http://scip.zib.de/>)
 - MIPCL (<http://www.mipcl-cpp.appspot.com/>)
 - lp_solve (<http://lpsolve.sourceforge.net/>)

Die bekannteste Open-Source Community im Bereich von mathematischen Solvern ist COIN-OR, welche auch die Entwickler von CBC sind. Hans Mittelmann veröffentlicht regelmäßig Performanzvergleiche von Open-Source und kommerziellen Lösern. Stand heute ist, dass der schnellste Open-Source Solver im Mittel etwa Faktor 7 mal so langsam ist wie die schnellste kommerzielle Bibliothek.²⁷⁰

Die oben genannten Solver und Suiten bieten in der Regel eine Vielzahl von direkten API (Application Programming Interface – Programmierschnittstelle) in die am weitesten verbreiteten Programmiersprachen wie Java, Python, C/C++ oder C#. Darüber hinaus gibt es oft auch direkte Integration in andere Softwareanwendungen wie Microsoft Excel oder Mathworks Matlab.

Die in Abschnitt 4.1.3 vorgestellten Tools verfügen über eine Vielzahl der hier erwähnten Preprocessing-Techniken. Bei den kommerziellen Produkten sind diese sogar in einem sehr hohen Reifegrad vorhanden, wodurch sich ein Großteil der besseren Leistung erklären lässt. Außerdem verbessern und beschleunigen die Anbieter ihre Methoden regelmäßig, so dass der Einsatz solcher Systeme auch zukunftssicher ist.

4.1.4 OR-Modellklassen und Komplexität

Um die Effizienz von Algorithmen und die Komplexität von Problemen zu messen, wird dabei oft die Problemgröße als Bewertungskriterium der Laufzeit herangezogen.²⁷¹ Bei LPs gilt tatsächlich der Grundsatz, dass je weniger Variablen, Nebenbedingungen und Anzahl der Matrixeinträge ungleich 0 im Modell existieren, desto einfacher bzw. schneller ist das Problem zu lösen. Gerade bei IP zeigt sich, dass nicht immer die minimale Beschreibung die Effizienteste ist. Es passiert häufig, dass die relaxierte Lösung sehr „unfreundlich“ gegenüber den Ganzzahligkeitsbedingungen ist, dass sie also sehr ungünstig bezüglich einer oder der optimalen ganzzahligen Lösung liegt.²⁷² Im Allgemeinen müssen daher andere Kenngrößen herangezogen werden, um die Problem- und Laufzeitkomplexität adäquat zu beschreiben.

Zur Darstellung der Problemkomplexität wird in der Regel die binäre Repräsentation benutzt, die im Grunde beschreibt, wie viel Information zur Repräsentation des Problems benutzt werden.²⁷³

²⁷⁰ Vgl. <http://plato.asu.edu/ftp/milpc.html> (Stand: 10.03.2018).

²⁷¹ Vgl. NEMHAUSER/WOLSEY (1999), S. 117.

²⁷² Vgl. CHEN/BATSON/DANG (2010), S. 80.

²⁷³ Vgl. NEMHAUSER/WOLSEY (1999), S. 118.

Die Laufzeitkomplexität eines Algorithmus zur Lösung des Problems ergibt sich dabei aus der Anzahl der arithmetischen Rechen- und Speicheroperationen auf Basis der Problemrepräsentation.²⁷⁴

Die meisten Probleme im Bereich von ganzzahliger Optimierung sind in der Klasse der \mathcal{NP} -vollständigen Probleme einzuordnen. Sie können also nicht mittels eines deterministischen Algorithmus mit polynomieller Laufzeitkomplexität gelöst werden. Trotzdem kann für eine gefundene Lösung in polynomieller Zeit entschieden werden, ob diese auch optimal ist.

Die folgenden beiden Abschnitte sollen sich daher speziellen Klassen widmen, die auf Grund der Eigenschaften entweder besonders einfach oder schwer zu lösen sind. Im ersten Abschnitt werden die Vorteile totaler Unimodularität der Nebenbedingungsmatrix für ganzzahlige Optimierung vorgestellt, die im zweiten Abschnitt dann ihre Anwendung im kostenminimalen Flussproblem findet. Zum anderen werden im zweiten Abschnitt auch Problemstrukturen vorgestellt, die tendenziell schwierig zu lösen sind.

4.1.4.1 Vorteile von totaler Unimodularität

Wird an die Theorie aus Abschnitt 4.1.2.1 und 4.1.2.2 angeknüpft, so ergibt sich die Frage, ob nicht Eigenschaften existieren, durch die die Lösung der Relaxierung bereits die optimale Lösung des ganzzahligen Programms ergibt. Dass solche Eigenschaften existieren, kann durch die totale Unimodularität einer Matrix gezeigt werden.

Definition 12. Eine Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ heißt total unimodular, falls die Determinanten aller quadratischen Untermatrizen entweder -1 , 0 oder 1 sind.

Aus der Definition folgt direkt, dass die Matrix selbst nur Einträge aus -1 , 0 und 1 hat. Mit den total unimodularen Matrizen folgt nun:

Satz 4. Sei $\max_{x \in \mathbb{R}^n} \{c^T x : Ax \leq b\}$ ein lineares Programm. Sei weiterhin A total unimodular und $b \in \mathbb{N}^m$. Dann ist jede optimale Lösung \hat{x} automatisch ganzzahlig.

Beweis. Siehe Theorem 19.1 aus SCHRIJVER (2000). □

In diesem Fall findet der Simplex-Algorithmus auf Grund seiner Eigenschaften automatisch eine ganzzahlige optimale Lösung.

Allerdings ist es nicht ganz trivial, totale Unimodularität einer beliebigen Matrix nachzuweisen. Daher wird eher auf Klassen von Matrizen bzw. Problemen gesetzt, bei denen die Eigenschaft bereits für die ganze Klasse gilt.

²⁷⁴ Vgl. WOLSEY (1998), S. 83.

4.1.4.2 Fluss-, Mengen und Knapsackprobleme

Eine Reihe von generischen Problemklassen weisen in ihrer Struktur spezielle Eigenschaften auf, die sich zunutze gemacht werden können, um Probleme effizient (z.B. mit spezialisierten Algorithmen) lösen zu können.²⁷⁵ Andere Problemklassen können vermutlich wiederum nicht effizient gelöst werden. Diese Klassen zu erforschen, ist eine weitere wichtige Disziplin des Operations Research. Dabei werden die Grundmodelle oft als Ausgangsbasis benutzt, um daraus weiterführende, konkrete Modelle für den praktischen Einsatz zu entwickeln. Im Folgenden werden die für die Beurteilung notwendigen Problemklassen beschrieben.

Definition 13 (Kostenminimales Flussproblem). Sei $G = (K, E)$ ein gerichteter Graph. Für jede Kante $(i, j) \in E$ sei dabei $u_{i,j} \in \mathbb{R}$ die maximale Flusskapazität über diese Kante und $c_{i,j} \in \mathbb{R}$ die Transportkosten für eine Einheit. Seien darüber hinaus die Variablen $x_{i,j} \in \mathbb{R}_0^+$ definiert als die Anzahl der zu transportierenden Einheiten von Knoten i zu Knoten j und $b_i \in \mathbb{R}$ die Nachfragen an den Knoten (positive Werte repräsentieren dabei Angebote und negative Werte entsprechende Bedarfe). Weiterhin ist $K^+(i) = \{k : (i, k) \in E\}$ und $K^-(i) = \{k : (k, i) \in E\}$ die jeweilige Menge der ein- und ausgehenden Kanten zu einem Knoten. Dann heißt das IP formuliert durch

$$\min \sum_{(i,j) \in E} c_{i,j} x_{i,j}$$

s.t.

1. $\sum_{k \in K^+(i)} x_{i,k} - \sum_{k \in K^-(i)} x_{k,i} = b_i \quad \forall i \in K$
2. $0 \leq x_{i,j} \leq u_{i,j} \quad \forall (i, j) \in E$
3. $x_{i,j} \in \mathbb{R} \quad \forall (i, j) \in E$

ein kostenminimales Flussproblem.

Sind Angebote und Bedarf durch $\sum_{i \in K} b_i \neq 0$ insgesamt nicht ausgeglichen, so hat das Problem folglich keine Lösung.²⁷⁶

Satz 5. Sind Nachfragemengen b_i und die maximale Flusskapazitäten $c_{i,j}$ eines kostenminimalen Flussproblems ganzzahlig, so ist das Polyeder der Nebenbedingungen automatisch ganzzahlig.

Beweis. Nach Proposition 3.4 in WOLSEY (1998) ist die Matrix der Nebenbedingungen total unimodular und damit folgt nach Satz 4 aus Abschnitt 4.1.4.1 die Ganzzahligkeit. \square

In diesem Fall liefert also der Simplex-Algorithmus bereits eine ganzzahlige Lösung. Dabei sind das klassische Transportproblem sowie das lineare Zuordnungsproblem Spezialfälle des kostenminimalen Flussproblems.

²⁷⁵ Vgl. WOLSEY (1998), S. 37.

²⁷⁶ Vgl. WOLSEY (1998), S. 41.

Die folgenden drei Klassen von Problemen sind für die folgende Arbeit ebenfalls von Bedeutung, denn sie bilden die Grundlage vieler praktischer Zuordnungsprobleme.²⁷⁷ Gegeben sei dazu $M = \{1, \dots, m\}$ mit $m \in \mathbb{N}$ als eine Menge von m Elementen und $\{M_1, \dots, M_j\}$ mit $M_i \subseteq M$ und $j \in N = \{1, \dots, n\}$ mit $n \in \mathbb{N}$ eine Menge von Teilmengen von M . Eine Teilmenge $F \subseteq N$ heißt

- **Überlagerung**, falls $\bigcup_{k \in F} M_k = M$
- **Verpackung**, falls $M_k \cap M_l = \emptyset$ für alle $k, l \in F$ mit $k \neq l$.
- **Zerlegung**, falls F eine Überlagerung und eine Verpackung ist.

Zur Problemformulierung werden Variablen wie folgt definiert:

$$x_j = \begin{cases} 1 & j \in F \\ 0 & j \notin F \end{cases}$$

Sei dazu $A \in \{0, 1\}^{m \times n}$ die sogenannte Inzidenzmatrix definiert als:

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & i \in M_j \\ 0 & i \notin M_j \end{cases}$$

Sei darüber hinaus $c^T = (c_1, \dots, c_m)$ der Gewichts- bzw. Kostenvektor und $\mathbb{1}$ der m -dimensionale Vektor, bei welchem alle Einträge 1 sind.

Definition 14 (Mengenzerlegungsproblem). *Seien A , c , n und $\mathbb{1}$ wie oben definiert. Dann heißt*

$$\min_{x \in \{0,1\}^n} \{c^T x : Ax = \mathbb{1}\}$$

ein kostenminimales Mengenzerlegungsproblem.

Analog dazu heißt $\max_{x \in \{0,1\}^n} \{c^T x : Ax \leq \mathbb{1}\}$ das gewichtsmaximale Mengenverpackungsproblem sowie $\min_{x \in \{0,1\}^n} \{c^T x : Ax \geq \mathbb{1}\}$ das kostenminimale Mengenüberdeckungsproblem.

Alle drei oben genannten Probleme sind dabei im Allgemeinen \mathcal{NP} -schwer. Allerdings kann das lineare Zuordnungsproblem auch als Spezialfall des kostenminimalen Mengenzerlegungsproblems betrachtet werden.

²⁷⁷ Vgl. NEMHAUSER/WOLSEY (1999), S. 7.

Ein weiteres, ebenfalls im Allgemeinen \mathcal{NP} -schweres Problem stellt das binäre Rucksack-Problem dar.

Definition 15 (Binäres Rucksack-Problem). *Es seien Objekte $i = 1, \dots, n \in \mathbb{N}$ mit Gewicht $a_i \in \mathbb{R}^+$ und Nutzwerten $c_i \in \mathbb{R}^+$ gegeben sowie ein Rucksack mit maximaler Zuladung b . Finde eine Nutzwert-optimale Bepackung des Rucksacks, also*

$$\max \sum_{i=1}^n c_i x_i$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i \leq b$$

$$x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n$$

In der Literatur wird sehr oft auch der englische Name Knapsack-Problem benutzt. Während das Knapsack Problem sich auch für große Instanzen einfach lösen lässt, ist das Mengenzerglegungsproblem deutlich aufwendiger zu lösen. Weitere bekannte Klassen sind etwa noch das Handlungsreisendenproblem (Traveling Salesman) und das Chinesische Postboten Problem, welche für diese Arbeit aber keine Rolle spielen.

Herausforderungen in der Praxis sind aber in der Regel, dass sich diese effizienten Modellklassen im Grundsatz nicht 1 : 1 in der Praxis anwenden lassen und dass durch eine einzige „kleine“ Veränderung spezielle Eigenschaften und entsprechende Vorteile auf einmal nicht mehr gelten. Darüber hinaus ist auch klar, dass wenn ein Problem eines der beschriebenen \mathcal{NP} -schweren als Teilproblem enthält, das gesamte Problem ebenfalls \mathcal{NP} -schwer ist.

4.2 Bewertung der Modelle aus der Literatur

Es gibt in der Literatur verschiedenste Ansätze, um die konzeptionellen und rechenintensiven Schwierigkeiten zu adressieren.²⁷⁸ Mit den Erkenntnissen aus dem vorherigen Abschnitt lassen sich nun die Modelle aus Abschnitt 3.2.1 zusammen mit den Anforderungen an die Modelle und Algorithmen aus 3.3.2.2 besser bewerten.

In den folgenden Abschnitten werden heuristische Ansätze sowie ganzzahlige Optimierungsmodelle auf Basis von Time-Space- und Time-Band-Netzwerken, Mengenüberdeckung und Verbindungen vorgestellt und diskutiert. Zur anschaulichen Erklärung der nachfolgenden Modelle soll mit folgendem minimalistischen Beispiel eines Flugplans und entsprechendem Flugzeugeinsatzplan aus Tabelle 4.1 gearbeitet werden.

²⁷⁸ Vgl. VISENTINI et al. (2014), S 544 ff.; FILAR/MANYEM/WHITE (2001), S. 329.

| Flugzeug | Flugnummer | Abflug | Ankunft | STD | STA |
|----------|------------|--------|---------|-------|-------|
| 1 | 01 | A | B | 05:00 | 08:00 |
| 1 | 04 | B | C | 09:30 | 11:00 |
| 1 | 07 | C | A | 13:00 | 17:00 |
| 1 | 11 | A | B | 18:30 | 21:30 |
| 2 | 03 | A | B | 08:00 | 11:00 |
| 2 | 06 | B | A | 12:30 | 15:30 |
| 2 | 09 | A | C | 17:00 | 21:00 |
| 3 | 02 | C | B | 06:30 | 08:00 |
| 3 | 05 | B | A | 09:30 | 12:30 |
| 3 | 08 | A | B | 14:00 | 17:00 |
| 3 | 10 | B | A | 18:30 | 21:30 |

Tabelle 4.1: Minimalistischer Beispielflugplan mit drei eingesetzten Flugzeugen

4.2.1 Heuristische Modelle ohne ganzzahlige Optimierung

Auf Grund der Anforderungen 26 zur Nutzung der standardisierten Technologie und Anforderung 28 zur Verwendung eines deterministischen Algorithmus müssen alle Beiträge als **nicht** relevant eingestuft werden, die ein rein-heuristisches oder nicht-deterministisches Lösungsverfahren ohne ganzzahlige Optimierung nutzen, welche in Tabellen 4.2 und 4.4 aufgelistet sind.

| Beitrag | Methode |
|------------------------------------|--|
| TEODOROVIĆ/GUBERINIĆ (1984) | Branching auf einem Graphenmodell |
| TEODOROVIĆ/STOJKOVIĆ (1990) | Heuristischer Algorithmus auf Basis von dynamischer Programmierung |
| TEODOROVIĆ/STOJKOVIĆ (1995) | Heuristischer Algorithmus auf Basis von dynamischer Programmierung |
| MATHAISEL (1996) | Out-of-Kilter (OKF) Netzwerkfluss-Algorithmus |
| TALLURI (1996) | Heuristik auf Basis von DELPRO |
| CAO/KANAFANI (1997a) & (1997b) | Quadratische Optimierung |
| LUO/YU (1997) ²⁷⁹ | Rein heuristisches Verfahren |
| STOJKOVIĆ/SOUMIS/DESROSIERS (1998) | Nicht-lineares Optimierungsproblem |
| STOJKOVIĆ/SOUMIS (2001) | Nicht-lineares Optimierungsproblem |

Tabelle 4.2: Forschungsbeiträge mit rein heuristischen Methoden oder ohne ganzzahlige Optimierung bis zum Jahr 2001

| Beitrag | Methode |
|---------------------------------|--|
| LØVE et al. (2002) | Heuristisches Framework aus Iterated Local Search (ILS) mit Variable Neighbourhood Search (VNS) und Steepest Ascent Local Search (SALS) |
| STOJKOVIĆ/SOUMIS (2005) | Nicht-lineares Optimierungsproblem |
| LIU et al. (2006) | Multi-objective Evolutionary Algorithm |
| CASTRO/OLIVEIRA (2007) | Spezialisiertes Agentenmodell |
| KOHL et al. (2007) | Heuristik mit lokaler Suche |
| ZHAO/ZHU (2007) | Grey Programming |
| ZHAO/ZHU/MEI (2007) | Grey Programming |
| LIU/JENG/CHANG (2008) | Multi-objective Genetic Algorithm (MMGA) ohne ganzzahliges Optimierungsproblem |
| ZHANG/HANSEN (2008) | Nicht-lineares Optimierungsproblem |
| GAO/TANG/ZHU (2009) | Rein heuristischer Greedy Simulated Annealing Algorithmus |
| BABIĆ et al. (2010) | Rein heuristischer Ansatz |
| LIU/CHEN/CHOU (2010) | Hybrider multikriterieller genetischer Algorithmus |
| ZEGORDI/JAFARI (2010) | Ant Colony Optimization (ACO) |
| BISAILLON et al. (2011) | Large Neighbourhood Search (LNS) ohne ganzzahliges Optimierungsmodell |
| CASTRO/OLIVEIRA (2011) | Multi-Agenten-System |
| AGUIAR/TORRES/CASTRO (2011) | Framework aus Hill-Climbing, Simulated Annealing und genetischem Algorithmus ohne ganzzahlige Optimierung |
| CHANG (2012) | Genetic Algorithm Based Integration Model |
| RAFIEI/MANZARI/KHASHEI (2012) | Ant Colony Optimization (ACO) |
| ZHAO/GUO (2012) | Kombination aus Greedy Random Adaptive Search Procedure (GRASP) und Ant Colony Optimization (ACO) |
| CASTRO/ROCHA/OLIVEIRA (2014) | Multi-Agenten-System mit selbstlernenden Algorithmen |
| SINCLAIR/CORDEAU/LAPORTE (2014) | Large Neighbourhood Search (LNS). Autoren definieren zwar ein ganzzahliges Modell, verwenden es im Rahmen der Lösungsfindung aber nicht. |
| ARIKAN/GÜREL/AKTÜRK (2016) | konisch-quadratisches Optimierungsproblem |
| HU et al. (2016) | Nicht-deterministische Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) |

Tabelle 4.3: Forschungsbeiträge mit rein heuristischen Methoden oder ohne ganzzahlige Optimierung von 2002 bis 2016

| Beitrag | Methode |
|------------------|--|
| CHEN/CHOU (2017) | Evolutionärer Algorithmus ohne ganzzahliges Optimierungsmodell |
| HU et al. (2017) | Kombination aus binärem Suchen und minimalen Kostenfluss. |

Tabelle 4.4: Forschungsbeiträge mit rein heuristischen Methoden oder ohne ganzzahlige Optimierung in 2017

4.2.2 Time-Space Netzwerke

Im Grunde baut ein Time-Space Netzwerk auf einem Graphen auf, wobei die Knoten zugleich einen Ort und eine Zeit repräsentieren. Flüge und Zeiten auf dem Boden werden über verschiedene Kanten repräsentiert. Abbildung 4.3 zeigt dabei das exemplarische Netzwerk auf Basis des Planes aus Tabelle 4.1 mit Flügen (schwarze Kanten) und Zeiten auf dem Boden (blaue Kanten).

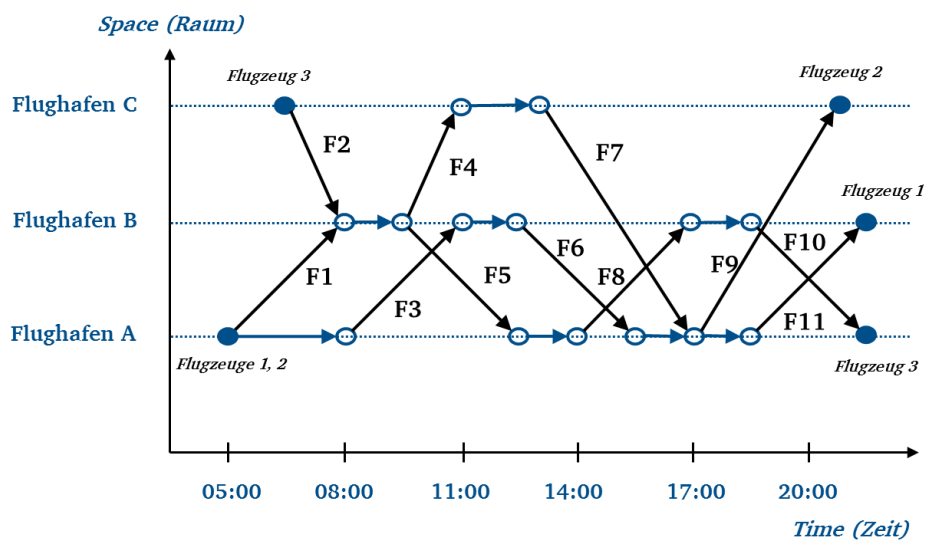


Abbildung 4.3: Time-Space-Netzwerk des exemplarischen Flugplans

Um neue Flugzeugumläufe generieren zu können, müssen dann einfach zusätzlich Bodenkanten dem Modell hinzugefügt werden. Das resultierende ganzzahlige Modell ergibt nach Definition 13 aus Abschnitt 4.1.4.2 in seiner Grundform ein Flussproblem und wäre damit in seiner theoretischen Form einfach zu lösen. Allerdings führt das notwendige Hinzufügen von zusätzlichen Nebenbedingungen und Variablen sofort zum Verlust dieser Eigenschaft.²⁸⁰

Dabei haben Time-Space Netzwerke im Bereich der Problemlösung für den Flugzeugeinsatz ihren Ursprung im Beitrag JARRAH et al. aus dem Jahr 1993, auf dessen Basis im Jahr 1996 bei

²⁸⁰ Vgl. MARLA/VAABEN/BARNHART (2017), S. 99; THENGVAL/BARD/YU (2000), S. 183.

United ein produktives Entscheidungsunterstützungssystem eingeführt wurde.²⁸¹ Zeitgleich erweiterten 1996 und 1997 YAN und seine Mitautoren das Grundmodell von JARRAH et al. um einige Funktionalitäten.²⁸² Parallel dazu wurden Time-Space Netzwerke von WEI/YU/SONG (1997) zur Lösung von operativen Störungen für den Creweinsatz entwickelt.²⁸³

In 2000, 2001 und 2003 haben THENGVALL/YU/BARD den Ansatz von Yan und seinen Mitautoren um einige weitere Funktionalitäten ergänzt.²⁸⁴ 2007 präsentierte Yang im Rahmen ihrer Dissertation Advanced Tabu Search Techniken zum Lösen der bisher entwickelten Time-Space Modelle. Parallel dazu entwickelten NISSEN/HAASE ein Modell zur Behebung von Störungen für den Creweinsatz auf Basis eines Schichtmodells.²⁸⁵

Zwar hat GAO in ihrer Dissertation in 2007 bereits einen ersten Ansatz zur gemeinsamen Betrachtung von Flugzeug- und Creweinsatz entwickelt, aber erst in 2015 haben ZHANG/LAU/YU diesen Ansatz mit einem Modell auf Basis von THENGVALL/YU/BARD und NISSEN/HAASE erneut aufgegriffen.²⁸⁶ VOS/SANTOS/OMONDI berücksichtigten als Erste in 2015 für ihr weiterentwickeltes Modell von THENGVALL/YU/BARD, dass zur Erfüllung der Anforderung 11 ein Mehrfachflussproblem auf Flugzeugebene definiert werden muss. Für bisherige Modelle wurden alle Flugzeuge einer Flotte als identisch bewertet. Dies erhöht zwar die Komplexität, ist aus praktischer Sicht aber notwendig.²⁸⁷ In 2016 haben SINCLAIR/CORDEAU/LAPORTE und ZHANG et al. gleichzeitig zum ersten Mal das Problem des Flugzeugeinsatzes und der Passagierbuchungssteuerung in einem Time-Space-Modell vereint.²⁸⁸ Der letzte relevante Beitrag aus 2017 erweitert die bisherigen Dimensionen des Flugzeugeinsatzes und der Passagierbuchungssteuerung um die Anpassung der Blockzeiten zur Aufholung möglicher Verspätung durch schnelleres Fliegen.²⁸⁹

Dabei ist wirklich bemerkenswert, dass nur die Beiträge von THENGVALL/YU/BARD (2001) und MARLA/VAABEN/BARNHART (2017) direkt und ohne zusätzliche Anpassungen auf die in Abschnitt 4.1.3 vorgestellte Softwareunterstützung von XPRESS und CPLEX setzen.²⁹⁰

Time-Space-Modelle müssen wie eingangs schon erwähnt als Mehrflussproblem realisiert werden, um mehrere Flotten und Wartung von einzelnen Flotten zu berücksichtigen.²⁹¹ Dazu kommt, dass durch Verspätungs- und flexible Positionierungsflüge das Modell quasi explodiert, da nun effektiv fast jeder Punkt im zwei-dimensionalen Graph einen Knoten mit kopierten und zusätzlichen Kanten bekommen kann. Außerdem können diese Modelle vermutlich nicht die Bo-

²⁸¹ Vgl. RAKSHIT/KRISHNAMURTHY/YU (1996), S. 57; JARRAH et al. (1993), S. 268.

²⁸² Vgl. YAN/TU (1997), S. 158–160; YAN/LIN (1997), S. 73–75; YAN/YOUNG (1996), S. 382–385; YAN/YANG (1996), S. 408–409.

²⁸³ Vgl. WEI/YU/SONG (1997), S. 308–310.

²⁸⁴ Vgl. THENGVALL/BARD/YU (2003), S. 393; THENGVALL/YU/BARD (2001), S. 292f; THENGVALL/BARD/YU (2000), S. 183.

²⁸⁵ Vgl. NISSEN/HAASE (2006), S. 262.

²⁸⁶ Vgl. ZHANG/LAU/YU (2015), S. 440; GAO (2007), S. 92ff.

²⁸⁷ Vgl. VOS/SANTOS/OMONDI (2015), S. 934.

²⁸⁸ Vgl. SINCLAIR/CORDEAU/LAPORTE (2016), S. 44–46; ZHANG et al. (2016), S. 217ff.

²⁸⁹ Vgl. MARLA/VAABEN/BARNHART (2017), S. 92f.

²⁹⁰ Vgl. MARLA/VAABEN/BARNHART (2017), S. 100; THENGVALL/YU/BARD (2001), S. 290.

²⁹¹ Vgl. YU/QI (2004), S. 65f.

denzeitmodelle der Fluggesellschaften nach Anforderung 7 unterstützen.²⁹² Trotzdem muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die eingesetzten Prototypen aus Abschnitt 3.2.2 mit 4 von 6 Beiträgen auf den Time-Space-Netzwerken aufsetzen.

4.2.3 Time-Band Netzwerke

Time-Band Netzwerke stellen im Prinzip ein vereinfachtes Time-Space-Netzwerk dar, indem einzelne Zeiträume als diskrete Zeitbänder zusammengefasst und damit die Knoten des Time-Space-Netzwerkes auf einen Knoten in einem Zeitband verdichtet werden. Dies wirkt dem entsprechenden Komplexitätsproblem des Time-Space-Netzwerkes entgegen.

Die prinzipielle Idee der Zeitbänder wurde erstmals von ARGÜELLO/BARD/YU in 1997 beschrieben.²⁹³ In 2001 wurde dann durch BARD/YU/ARGÜELLO das erste Time-Band-Netzwerk für Störungen im Flugzeugeinsatz entwickelt, welches auch direkt mit CPLEX gelöst wurde.²⁹⁴

Erst in 2013 wurde der Ansatz von ARGÜELLO/BARD/YU wieder durch LEI et al. aufgegriffen.²⁹⁵ In 2015 wurden dann durch den Beitrag von HU et al. verschiedene Problemstellungen im operativen Betrieb für den Flugzeugeinsatz und Passagierbuchungssteuerung mittels eines Time-Band Netzwerkes und CPLEX gelöst.²⁹⁶

Allerdings sind Time-Band Netzwerke noch weniger geeignet als Time-Space-Modelle, was sich auch durch die sehr geringe Anzahl an Beiträgen widerspiegelt. Die zusammengefassten Knoten erlauben keinerlei detaillierte zeitliche Betrachtung der Bodenereignisse mehr.

4.2.4 Modelle auf Basis von Mengenüberdeckung oder Mengenzerlegung

Entsprechend der vorgestellten OR-Modelle aus Abschnitt 4.1.4.2 kann auch die Mengenüberdeckung oder -zerlegung als Grundlage verwendet werden, indem die Menge der Flüge als Basismenge M betrachtet wird und die Teilmengen M_i dann die zulässigen Flugzeugumläufe, Crew Pairings oder Passagierreisewege beschreiben.²⁹⁷ Im Anschluss wird versucht, eine kostenminimale (bzw. gewichtsmaximale) Überdeckung oder Zerlegung zu finden. Abbildung 4.4 zeigt dabei die Überdeckungen der Menge anhand des beispielhaften Flugplans aus Tabelle 4.1.

Diese Ansätze haben allerdings den zentralen Nachteil, dass nicht alle Routen (möglichen Teilmengen M_i) auf Grund der Komplexität vorberechnet werden können, da die Routen in der Zahl der Flüge exponentiell wachsen. Spätestens, wenn Verspätungen und die Betrachtung auf einzelne Flugzeuge mit einbezogen werden, ergeben sich nicht mehr darstellbare Modelle auf Grund der Vielzahl von Variablen.

²⁹² Vgl. MARTINEZ/ERGAN (2013), S. 8.

²⁹³ Vgl. ARGÜELLO/BARD/YU (1997), S. 223.

²⁹⁴ Vgl. BARD/YU/ARGÜELLO (2001), S. 934, 941.

²⁹⁵ Vgl. LEI et al. (2013), S. 1.

²⁹⁶ Vgl. HU et al. (2015), S. 133f.

²⁹⁷ Vgl. YU/QI (2004), S. 73.

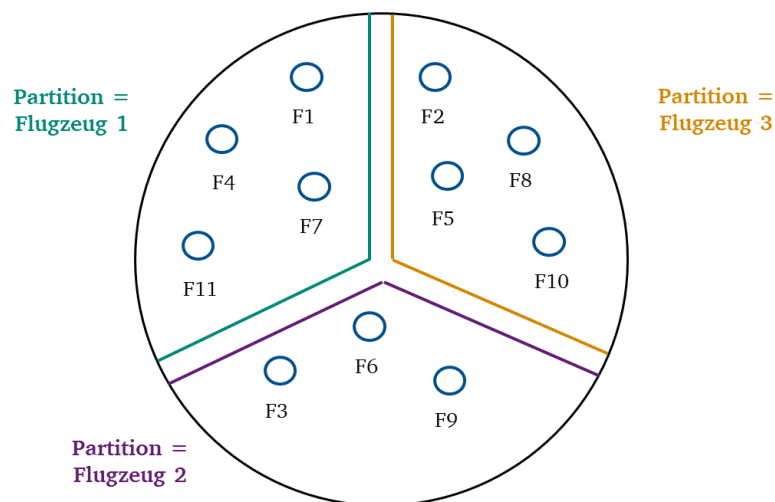


Abbildung 4.4: Exemplarischer Flugplan als Mengenüberdeckungsproblem

Folglich können auch kommerzielle Bibliotheken wie CPLEX dieses Problem alleine nicht lösen.²⁹⁸ Dementsprechend kann viel Aufwand darin investiert werden, schlaue Algorithmen und Modelle zur effizienten Generierung möglicher Routen zu entwickeln.

Der Ursprung dieser Modelle geht auf die Dissertationen von LETTOVSKY in 1997 und CLARKE in 1998 zurück.²⁹⁹ Insbesondere die Arbeit von LETTOVSKY legt dabei den Grundstock für ein integriertes Modell zur Lösung aller Problemdimensionen. In LETTOVSKÝ/JOHNSON/NEMHAUSER (2000) wurde das Modell von LETTOVSKY nur für den Creweinsatz modifiziert und um die sogenannten Deadhead Crews ergänzt.³⁰⁰ In 2003 wurde das Ursprungsmodell für das reine Problem des Flugzeugeinsatzes adaptiert.³⁰¹ Parallel dazu ging dazu ein entsprechendes Modell bei Continental Airlines als Entscheidungsunterstützungssystem auf Basis eines Mengenüberdeckungsproblems in Produktion.³⁰²

Da seit 2003 im Schnitt jedes Jahr ein entsprechender Beitrag auf Basis eines solchen Ansatzes erschienen ist, wird diese Entwicklung in tabellarischer Übersicht in 4.5 dargestellt. Prinzipiell bieten solche Ansätze den großen Vorteil, dass sich bei der Bildung von möglichen Umläufen, Pairings, Rosterings oder Reisewegen prinzipiell jede x-beliebige Abfolge von Flügen berücksichtigen lässt. Dies ermöglicht auch, fast jede Regel einer Fluggesellschaft zu berücksichtigen, da eine generierte Abfolge auf allen möglichen Regeln uneingeschränkt geprüft werden kann. Allerdings müssen auch verschiedene Grundansätze zur effektiven Generierung diskutiert werden.

²⁹⁸ Vgl. YU et al. (2003), S. 22.

²⁹⁹ Vgl. CLARKE (1998a), S. 55ff.; LETTOVSKY (1997), S. 48f.

³⁰⁰ Vgl. LETTOVSKÝ/JOHNSON/NEMHAUSER (2000), S. 342.

³⁰¹ Vgl. ROSENBERGER/JOHNSON/NEMHAUSER (2003), S. 411f.

³⁰² Vgl. YU et al. (2003), S. 18.

| Jahr | Beitrag |
|------|---|
| 2004 | ABDELGHANY ET AL. (2004a) |
| 2005 | GUO (2005) |
| 2006 | BRATU/BARNHART (2006) |
| 2007 | EGGENBERG/SALANI/BIERLAIRE (2007); MEDARD/SAWHNEY (2007) |
| 2008 | ABDELGHANY/ABDELGHANY/EKOLLU (2008) |
| 2010 | CHEN/CHEN/ZHANG (2010); PETERSEN ET AL. (2010); EGGENBERG/SALANI/BIERLAIRE (2010); JAFARI/ZEGORDI (2010) |
| 2011 | JAFARI/ZEGORDI (2011); LE/SUN (2011) |
| 2012 | WU/LE (2012) |
| 2013 | LE/WU (2013) |
| 2014 | ZHANG/LAU (2014) |
| 2015 | MAHER (2015a) & (2015b) |
| 2017 | WU et al. (2017) |

Tabelle 4.5: Übersicht der Forschungsbeiträge zwischen 2004 und 2017 auf Basis von Mengenüberdeckungs- oder Mengenzerlegungsproblemen

Da nicht alle x-beliebigen Abfolgen erzeugt werden können, gibt es verschiedene Strategien, um diesen Nachteil zu umgehen:

1. Nur so viele Möglichkeiten aufbauen, dass die Komplexität noch exakt in einem Modell berechnet werden kann.
2. Einsatz der in Abschnitt 4.1.2.7 vorgestellten Lösungsmethoden, um eine größere Anzahl an Variablen zu verarbeiten.
3. Mehrere separate Teilprobleme (z.B. Generierung von Flugrouten und Flugzeugzuweisung) nacheinander lösen.
4. Einsatz von Heuristiken zur Lösung von Problemen oder zur Generierung von Abfolgen.
5. Kombination der oben genannten Methoden.

In der Regel verstoßen die genannten Strategien aber gegen die Anforderung 25 der Generalisierbarkeit, da entweder die Abfolgen nicht allgemeingültig genug aufgebaut werden oder für eine effiziente Dekomposition nicht alle notwendigen Funktionalitäten aus Abschnitt 3.3.1 abgedeckt werden können.

4.2.5 Anschlussbasierte Modelle

Ein in der Forschung bisher wenig beachteter Ansatz basiert auf der Idee, die in Abschnitt 4.2.2 genutzte Repräsentation als Graph etwas anders zu nutzen. In diesem Fall stellen die Knoten nun die Flüge dar und die Kanten die Verbindung bzw. den Anschluss zwischen diesen Flügen. Abbildung 4.5 zeigt das Beispiel aus Tabelle 4.1 als anschlussbasiertes Netzwerk.

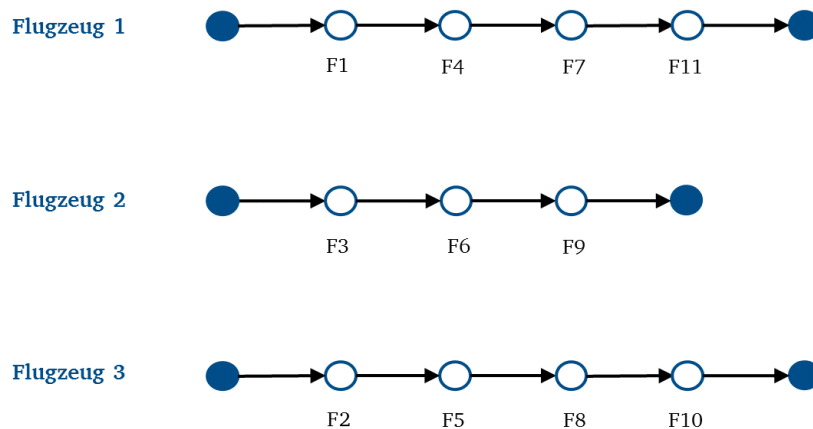


Abbildung 4.5: Darstellung des exemplarischen Flugplans als anschlussbasiertes Netzwerk

Dabei lässt sich das Problem analog dem Time-Space-Modell als minimales Flussproblem modellieren und ist dabei erwartungsgemäß etwas kleiner, da im Time-Space-Modell etwa in der Größenordnung von 2 Knoten (unter Umständen auch weniger, falls Flüge zur gleichen Zeit landen und/oder starten) pro Flug benötigt werden, während für das anschlussbasierte Modell nur ein Knoten pro Flug und jeweils zwei pro Flugzeug benötigt werden. In unserem minimalistischen Beispiel sind es 21 gegen 17 Knoten.

Auf den ersten Blick scheinen ähnliche Problematiken wie bei einem Time-Space-Netzwerk zu existieren. Für jede neue mögliche Verbindung zwischen zwei Flügen muss eine zusätzliche Kante pro Flugzeug angelegt werden (im Time-Space eine neue Bodenkante), was die Komplexität innerhalb der Nebenbedingungen schnell steigen lässt. Allerdings lassen sich im anschlussbasierten Netzwerk die Verspätungen als explizite Variable pro Flug pro existierendem Knoten kodieren, was somit deutlich effizienter ist als für jeden Flug eine duplizierte Kante mit jeweils 2 Knoten hinzufügen. In beiden Fällen wird jeweils eine zusätzliche Nebenbedingung pro ursprünglichem Flug benötigt.

Die Idee dieser Modelle geht auf den Beitrag ANDERSSON/VÄRBRAND aus dem Jahr 2004 zurück.³⁰³ In 2006 und 2012 wurden nochmals insgesamt drei zusätzliche heuristische Algorithmen (Lo-

³⁰³ Vgl. ANDERSSON/VÄRBRAND (2004), S. 96.

kale Suche und Ameisenalgorithmus) vorgestellt.³⁰⁴ FLUCK/BRAND/DORNDORF präsentierten im Rahmen des AGIFORS Operations Meeting 2013 in Frankfurt ein bereits praktisches, prototypisches Entscheidungsunterstützungssystem für den Flugzeugeinsatz auf Basis dieses Modells.³⁰⁵ Ein theoretisches Modell für den Flugzeug- und Creweinsatz wurde in 2015 dann von NICKKAR et al. auf Basis des ursprünglichen Modells von ANDERSSON/VÄRBRAND entwickelt.³⁰⁶ Allerdings verwendet keiner der Beiträge kommerzielle Software zum Lösen der Probleme.

4.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Methoden der ganzzahligen Optimierung in der Lage sind, die im Rahmen einer Entscheidungsunterstützung auftretenden Probleme zu adressieren. Außerdem besteht auf Grund der breiten Palette von kommerziellen und frei verfügbaren Systemen prinzipiell kaum die Notwendigkeit, eigene Algorithmen für ganzzahlige Optimierung zu implementieren. Trotzdem nutzen nur eine überschaubare Anzahl von Beiträgen überhaupt diese Bibliotheken. Um die volle Geschwindigkeit einer kommerziellen Bibliothek nutzen zu können, besitzt Gurobi in der aktuellen Version 7.5.2 beispielsweise über 100 anpassbare Parameter, welche natürlich auf das Problem zugeschnitten werden müssen.³⁰⁷ Im Rahmen der in einer kommerziellen Lizenz inkludierten Wartungsgebühr assistiert Gurobi sogar bei der Kalibrierung dieser Parameter.

Beachtlich ist, dass etwa 40% der Beiträge kein ganzzahliges Optimierungsproblem enthalten, obwohl die bisher erfolgreichen Prototypen zumeist auf einem ganzzahligen Optimierungsmodell mittels eines Time-Space-Netzwerks aufbauen. Im Bereich der Modelle auf Basis der Mengenüberdeckung hat sich die Forschung sehr stark auf die algorithmischen Aspekte konzentriert und dabei zwangsläufig die fachlichen Anforderungen der Praxis immer wieder stark vereinfacht, um die Laufzeit der Algorithmen zu verbessern. Mit diesen Erkenntnissen ist somit auch die dritte Forschungsfrage beantwortet.

Auch wenn die anschlussbasierten Modelle bisher sehr wenig Beachtung gefunden haben, soll der nächste Abschnitt zeigen, dass diese zur Entwicklung eines praktischen Entscheidungsunterstützungssystems in Kombination mit einer kommerziellen Bibliothek entsprechend der bestehenden Anforderungen betrieben werden können.

³⁰⁴ Vgl. RAFIEI/MANZARI/KHASHEI (2012), S. 4f.; ANDERSSON (2006), S. 38f.

³⁰⁵ Vgl. FLUCK/BRAND/DORNDORF (2013), S. 10.

³⁰⁶ Vgl. NICKKAR et al. (2015), S. 22f.

³⁰⁷ Vgl. <http://www.gurobi.com/documentation/7.5/refman/parameters.html> (Stand: 11.03.2018).

5 JARVIS - Just A Rather Very Intelligent Solver

Dass die bisher gewonnen Erkenntnisse über die Anwendungsfälle, Anforderungen sowie Modelle und Algorithmen für die Praxis valide sind, konnte in der letzten Phase der vierjährigen Forschungsk Kooperation zwischen der TU Darmstadt und einem Konzern von europäischen Fluggesellschaften mit der Entwicklung eines ausgereiften Prototypen gezeigt werden. Bei der Entwicklung ist dabei auf einen praxiskompatiblen Ansatz geachtet worden, so dass ein Prototyp gebaut wurde, der sich schrittweise zu einem vollfunktionalen Produkt weiterentwickeln lässt.³⁰⁸

Entsprechend des in Abschnitt 2.2 und 2.2.3 dargestellten Aufbaus sowie der betrachteten Prozesse bietet es sich an, ein Entscheidungsunterstützungssystem für die zentrale Verkehrsleitung zu entwickeln, da diese in nahezu jeder Fluggesellschaft benötigt und vertreten ist. Dabei muss das zu entwickelnde System dann berücksichtigen, dass die Gestaltung der anderen Funktionsbereiche flexibel je nach Fluggesellschaft möglich ist. Das System muss daher explizit keine detaillierte Lösung für alle Problemdimensionen gleichzeitig liefern. Bei der Generierung eines neuen Flugplans, welcher durch die Verkehrszentrale letztendlich freigegeben wird, müssen die Ziele und Nebenbedingungen der anderen Funktionsbereiche so mit einbezogen werden, dass im Rahmen der etablierten Entscheidungsprozesse mit weniger Iterationen schneller eine gültige und bessere Lösung im Sinne von weniger Verspätungen oder Streichungen gefunden wird. Der primäre Fokus liegt also darin, ein möglichst lösbares Szenario und für die Folgeprozesse „freundliche“ Lösung zu produzieren. Eine globale Optimierung, welche eine exakte Lösung für alle Problemdimensionen liefert, ist bei der bestehenden Organisation und den getrennten IT-Systemen nur schwerlich zu realisieren.³⁰⁹

Im ersten Abschnitt soll die Ausgangssituation und die allgemeine Vorgehensweise zur Entwicklung des Prototyps beschrieben werden, bevor das Systemdesign sowie das mathematische Modell in Form eines ganzzahligen Programms beschrieben werden. Schließlich werden umfangreiche Tests der Performanz und Lösungsqualität, zum Teil zusammen mit den Anwendern, durchgeführt und dokumentiert. Zum Ende sollen noch zentrale Erkenntnisse aus dem Einführungsprozess in den Betrieb berichtet werden, bevor das Kapitel mit einer Zusammenfassung abschließt.

³⁰⁸ Vgl. ANDERSSON (1989), S. 9.

³⁰⁹ Vgl. EKOLLU/NARASIMHAN (2005), S. 7.

5.1 Ausgangssituation und Vorgehensweise

Aufgrund des Unternehmenswachstums und der gestiegenen operativen Komplexität sowie der hohen Störungsintensität durch überlastete Infrastrukturen im Luftverkehr ist ein entsprechendes System zur Entscheidungsunterstützung der Verkehrsleitung notwendig geworden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zwei Verkehrszentralen ausgewählt, mit denen JARVIS erprobt werden sollte. Verkehrsleitung und Flugzeugeinsatz nutzen in beiden Fällen eine gemeinsame Software, welche eine eigene Entwicklung der Fluggesellschaft analog des im Abschnitt 2.3.1 und 2.3.2 dargestellten Systems *NetLine/OPS ++* entspricht. Dies ermöglichte Modifikationen bzw. Erweiterungen am System ohne zusätzliche Abstimmungen mit einem weiteren Anbieter.

Auch wenn beide Verkehrszentralen ein ähnliches Hub-and-Spoke-Netzwerk von Flügen steuern, sind die Anforderung auf Grund der Infrastruktur der Hubs, Flottenmix und Vernetzung mit Regionalpartnern sowie interne Organisation unterschiedlich genug, um die notwendige Flexibilität des Tools unter Beweis zu stellen. Vor dem Hintergrund der Harmonisierung von IT-Systemen im Konzern, sollte bei der Entwicklung speziell darauf geachtet werden, dass ein neu entwickeltes System später auch für die verbleibenden Fluggesellschaften mit möglichst geringem Anpassungsaufwand ausgerollt werden kann.

In den folgenden beiden Abschnitten sollen zunächst erste ausgewählte Anwendungsfälle präsentiert werden, bevor das allgemeine Implementierungsvorgehen geschildert wird.

5.1.1 Auswahl von Anwendungsfällen

Im Zuge der iterativen Entwicklung wurden für die erste Entwicklungsiteration die folgenden vier aus den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Anwendungsfälle ausgewählt:

Anwendungsfall 1: AOG

Trotz der technisch sehr hohen Verfügbarkeit kommt es regelmäßig zu Schäden durch Blitz- oder Vogelschlag an Flugzeugen oder es muss wegen Unklarmeldung des Fluggeräts zusätzliche Zeit in die Fehlersuche investiert werden. Da Sicherheit ein zentraler Aspekt in der Luftfahrt ist, muss oft jedem kleinen Verdacht auf einen technischen Defekt nachgegangen werden.

Anwendungsfall 2: Kapazitätsreduzierungen

Insbesondere der Flughafen London Heathrow (LHR) wird im Herbst und Winter häufig von mehrstündigen Nebelbänken heimgesucht. Dabei können unter der eingeschränkten Sicht weniger Flüge starten- und landen, was zu sofortigen Streichungen von Flügen führt, da Heathrow ganztägig komplett ausgelastet ist und keine Puffer besitzt.³¹⁰ Da der Kooperationspartner mehrfach am Tag viele Geschäftsreisende von und nach London fliegt, ist dies für ihn ein zentraler Anwendungsfall.

³¹⁰ Vgl. PEJOVIC et al. (2009), S. 241.

Anwendungsfall 5: Kaskadierende Effekte minimieren

Auf Grund der größeren Nachfrage kommt es schnell zur Überlastung der größeren europäischen Flughäfen und wirkt sich extrem auf die entsprechend straffen Sommerflugpläne der europäischen Fluggesellschaften aus.³¹¹

Anwendungsfall 7 : Crew-Flugzeug-Umlaufsynchronisierung

Da große Teile der Kurz- und Mittelstreckenflotte aus mehreren Flugzeugtypen bestehen, die aber alle mit einem Type Rating geflogen werden können, werden Zuweisungen der Flugzeuge im Rahmen der mittelfristigen kommerziellen Steuerung oder Wartungsplanung noch angepasst. Daraus resultieren aber häufige Umstiege der Crews zwischen Flugzeugen. Diese durch zusätzliche Tausche im Flugzeugeinsatz wieder zu reduzieren, wird in der Regel in den Nachtschichten als vorbereitende Tätigkeit für den nächsten Tag durchgeführt.

Diese Auswahl erster Fälle ist natürlich auf die Prioritäten des Forschungspartners zugeschnitten. Für andere Fluggesellschaften können diese, wie eingangs beschrieben, unterschiedlich sein. Zusätzliche Anwendungsfälle sollen in weiteren Iterationen dann hinzugefügt werden, siehe dazu auch Abschnitt 5.2.4 zu den geplanten Entwicklungen. Einzig der Anwendungsfall 6 zu den Ground Delay Programmen liegt für europäische Airlines nicht im Fokus und wird daher auch zukünftig nicht implementiert.

5.1.2 Implementierungsvorgehen

In den meisten Fällen testen Forschungsbeiträge ihre Modelle und Algorithmen auf einem oder mehreren von einer Fluggesellschaft zur Verfügung gestellten Datensätzen, die dann nur seitens der Autoren diskutiert und der Fluggesellschaft die Ergebnisse zu Verfügung gestellt werden. Im Rahmen der Entwicklung von JARVIS wurde sich dabei stattdessen an einen praxisnahen, iterativen Implementierungsansatz gehalten.³¹² Dazu wurden im ersten Schritt über etwa 4 Monate folgende Aktivitäten durchgeführt:

1. Sammeln erster Anforderungen und Verstehen der Entscheidungsprozesse.
2. Entwurf und Implementierung eines einfachen, ersten Prototyps mit fachlicher Basisfunktionalität sowie Integration in ein bestehendes System.

Um die Entscheidungsprozesse zu verstehen, wurden über vereinzelte Wochen mehrere verschiedene Schichten bei unterschiedlichen Mitarbeitern begleitet und jeweils ein Protokoll über die beobachteten Erkenntnisse angefertigt. Dabei wurden durch Fragen seitens der Beobachter versucht, die Aspekte getroffener Entscheidungen genauer zu begreifen und zu hinterfragen, um dabei den in Anforderung 1 beschriebenen Effekt des reinen Lösungsdenken zu umgehen. Durch die direkte Integration von JARVIS in das Testsystem des operativen Leitstandes, welches eine exakte Reproduktion des Produktivsystems ist, war es daher von Anfang an möglich, die Anwender

³¹¹ Vgl. SANTOS/ROBIN (2010), S. 397.

³¹² Vgl. EKOLLU/NARASIMHAN (2005), S. 8.

in die Entwicklung adäquat mit einzubinden. Die Beschreibung der Integration wird in Abschnitt 5.2.1 noch dargestellt. Darüber hinaus können Tests zusammen mit den Anwendern sofort in gewohnter Arbeitsumgebung durchgeführt werden und Ergebnisse direkt diskutiert werden.

Ausgehend von diesem ersten Schritt sind nun kleinere Iterationsschritte auf Monatsbasis mit folgenden Tätigkeiten durchgeführt worden:

- Testen und Kalibrieren der Anwendung mit den Anwendern
- Ableitung von Korrektur-, Verbesserungs- und Erweiterungsmaßnahmen
- Implementierung und Dokumentation
- Entsprechende Schulung und Training der Anwender

Das Vorgehen und die Herausforderungen der einzelnen Schritte wird später in Abschnitt 5.3 noch im Rahmen der produktiven Einführung adressiert.

5.2 Systemdesign und -modell

Das Systemdesign von JARVIS orientiert sich an der Arbeit von GRÖNKVIST (2005), die ebenfalls ein Geschäftsregelmanagementsystem im Rahmen der initialen Flugzeugeinsatzplanung als Planungsproblem behandeln.³¹³ Die Architektur des vorgeschlagenen Systems besteht dabei aus den vier Komponenten:

- Zentrale Schnittstelle zur Systemanbindung (Middleware)
- Modell-Generator/Übersetzer für ganzzahlige Optimierungsmodelle
- Geschäftsregel-Managementsystem (GRMS)
- Kommerziell verfügbares Lösungssystem (Gurobi) für ganzzahlige Optimierung

In Abbildung 5.1 ist die Gesamtarchitektur inklusive Aufgaben und Interaktion der Komponenten dargestellt. Dabei basiert das System auf einem Auftrags-Mechanismus. Aus dem Verkehrsleitsystem werden Aufträge mit allen notwendigen Bewegungs- und Stammdaten in ein Austauschformat mittels JavaScript Object Notation (JSON) gepackt und an JARVIS gesendet. Dieser führt dann die Optimierungen durch und meldet verschiedene Zwischenergebnisse inklusive der Lösung wieder im JSON-Format an das Auftraggeber-System zurück.

³¹³ Vgl. GRÖNKVIST (2005), S. 196.

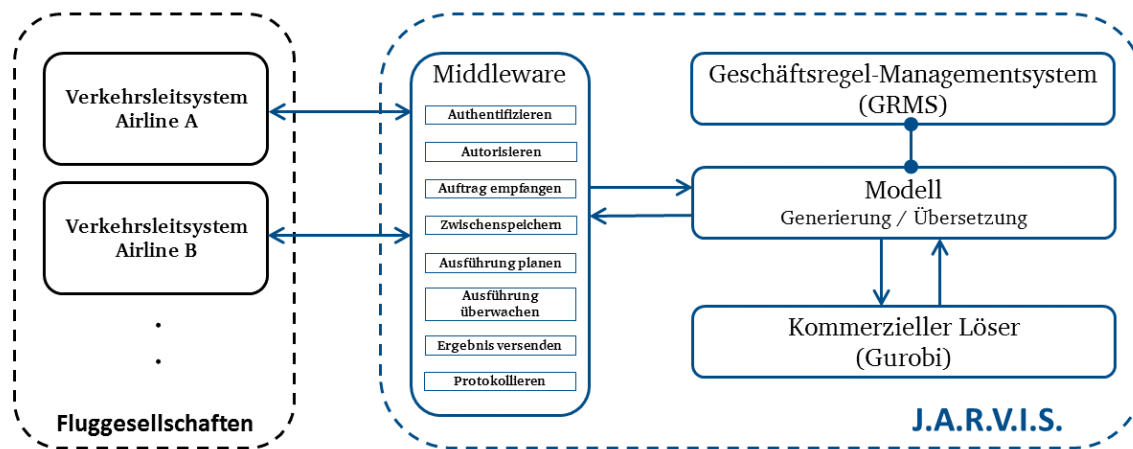


Abbildung 5.1: Gesamtarchitektur von JARVIS

Das SaaS-Design ermöglicht daher die flexible Anbindung an verschiedene in der Verkehrszentrale bereits eingesetzte und etablierte IT-Systeme. Dabei wird ein möglichst minimaler Eingriff in die bestehenden Systeme durchgeführt, wie später noch in Abschnitt 5.2.1 genauer dargestellt. Da das Verkehrsleitsystem den „Single Point of Truth“ darstellt, kann eine schlanke Integrationsschicht verwendet werden. Außerdem kann auf den Mechanismus der separaten Datenspeicherung mit entsprechend umfangreicher Integrationsschicht, wie in verschiedenen Forschungsbeiträgen vorgeschlagen, verzichtet werden.³¹⁴ Zudem erlaubt SaaS auch den Einsatz in einer Cloud, so dass Ressourcen leistungs- und kostenorientiert für parallele Berechnungen eingesetzt werden können (Anforderung 24).

Durch die Unterteilung in den Modell-Generator und das daran angeschlossene Geschäftsregel-Managementsystem werden Geschäftslogik und Optimierungslogik derart von einander getrennt, dass bei Definition und Anpassung der Geschäftsfalllogik kein Eingriff in den Software-Code für die Generierung oder Lösung des Optimierungsmodells vorgenommen werden muss. Für Fluggesellschaften ist es in der Praxis notwendig, dass ihre individuellen Entscheidungsregeln durch ein solches System berücksichtigt werden.³¹⁵ Dazu wurde ein generalisiertes Optimierungsmodell entwickelt, das unterschiedliche Anforderungen des operativen Managements von verschiedenen Fluggesellschaften mittels des GRMS flexibel abbilden kann. Verbindet sich eine Anwendung mit JARVIS, so werden entsprechend der ausgewählten Fluggesellschaft die individuellen Regeln und Parameter aus dem GRMS geladen.

³¹⁴ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 155; YU/QI (2004), S. 9.

³¹⁵ Vgl. ABDI/SHARMA (2007), S. 137.

Der Einsatz des kommerziellen Löser von Gurobi, welcher bereits in Abschnitt 4.1.3 erwähnt wurde, ermöglicht dann das effiziente und schnelle Lösen der generierten Optimierungsmodelle. Dabei können diese nahezu exakt gelöst werden und somit die von 1989 aufgestellte Aussage, dass nur heuristische Verfahren auf Grund der Komplexität angewendet werden können, revidieren.³¹⁶

Implementiert ist JARVIS in der Programmiersprache Python³¹⁷ in Version 3, welche sowohl eine API zu Gurobi als auch zum GRMS besitzt. Zur Speicherung der JSON-Inhalte dient eine flexible dokumentenorientierte Datenbankinstanz einer MongoDB³¹⁸. Für das Kommunikationsprotokoll wurde die ZeroMQ³¹⁹ verwendet, die nahezu jede Programmiersprache und Plattform unterstützt. Betrieben werden die Komponenten auf verschiedenen, skalierbaren Instanzen mit Linux Betriebssystemen eines namhaften, führenden Anbieters für Cloudtechnologien, mit welchen der Forschungspartner eine entsprechende Kooperation unterhält.

In den nächsten Abschnitten werden die einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel genauer analysiert. Zur Anbindung des JARVIS Systems, welches an sich keine zugängliche, grafische Oberfläche besitzt, muss eine entsprechende nahtlose Anbindung in die funktionelle Bedienweise des Verkehrsleitsystems geschaffen und an die Middleware angebunden werden. Darüber hinaus wird die Idee der Vernetzung von Optimierung und GRMS konzeptionell und technisch beschrieben, um folglich das zugrunde liegende mathematische Modell zu definieren. Zum Abschluss werden noch einige Aspekte des zukünftigen Entwicklungsplanes diskutiert, da sich das System mit Abschluss dieser Arbeit zum Teil bereits im produktiven Betrieb befindet.

5.2.1 Integration in das bestehende Verkehrsleitsystem

Die Entwicklung der graphischen Komponenten sowie der Middleware stellt dabei eine Gemeinschaftsleistung mit den beteiligten Softwareentwicklern des bereits existierenden Verkehrsleitsystems des Forschungspartners dar, während die übrigen Komponenten als Teil dieser Arbeit implementiert wurden. Als Ausgangsbasis für die in Abbildung 5.2 dargestellte Oberfläche wurden sogenannte Vorlagen angefertigt, die mit den Anwendern in Workshops entwickelt wurden.

Um eine benutzerfreundliche Oberfläche zu entwickeln, sind die in Abschnitt 3.3.3 genannten Anforderungen berücksichtigt worden. Aus Abbildung 5.3 ist zu entnehmen, dass das sogenannte JARVIS Widget selbst aus zwei Tabs besteht, um zum einen Optimierungsaufträge aufzusetzen und zum anderen abgesendete Aufträge zu überwachen und Lösungen zu empfangen.

³¹⁶ Vgl. ANDERSSON (1989), S. 8.

³¹⁷ <http://www.python.org>.

³¹⁸ <https://www.mongodb.com/de>.

³¹⁹ <http://zeromq.org/>.

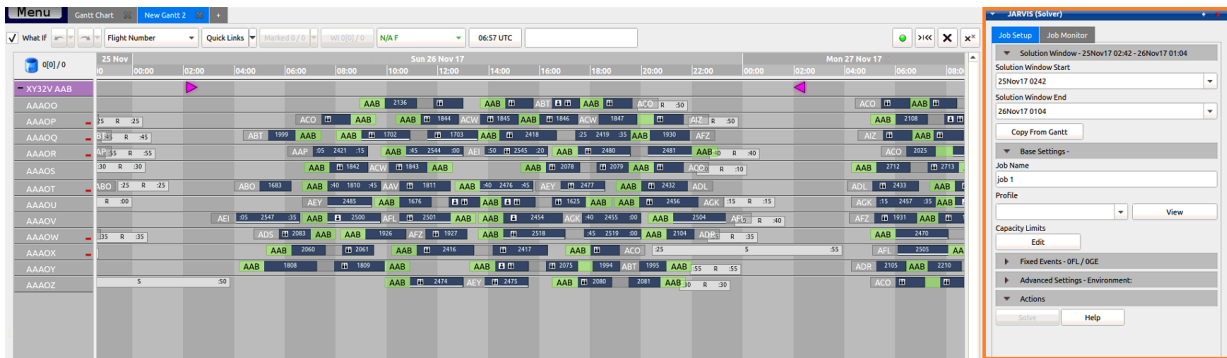


Abbildung 5.2: Neu integrierte JARVIS Oberfläche (orange umrandet) in bereits bestehendes Verkehrsleitsystem

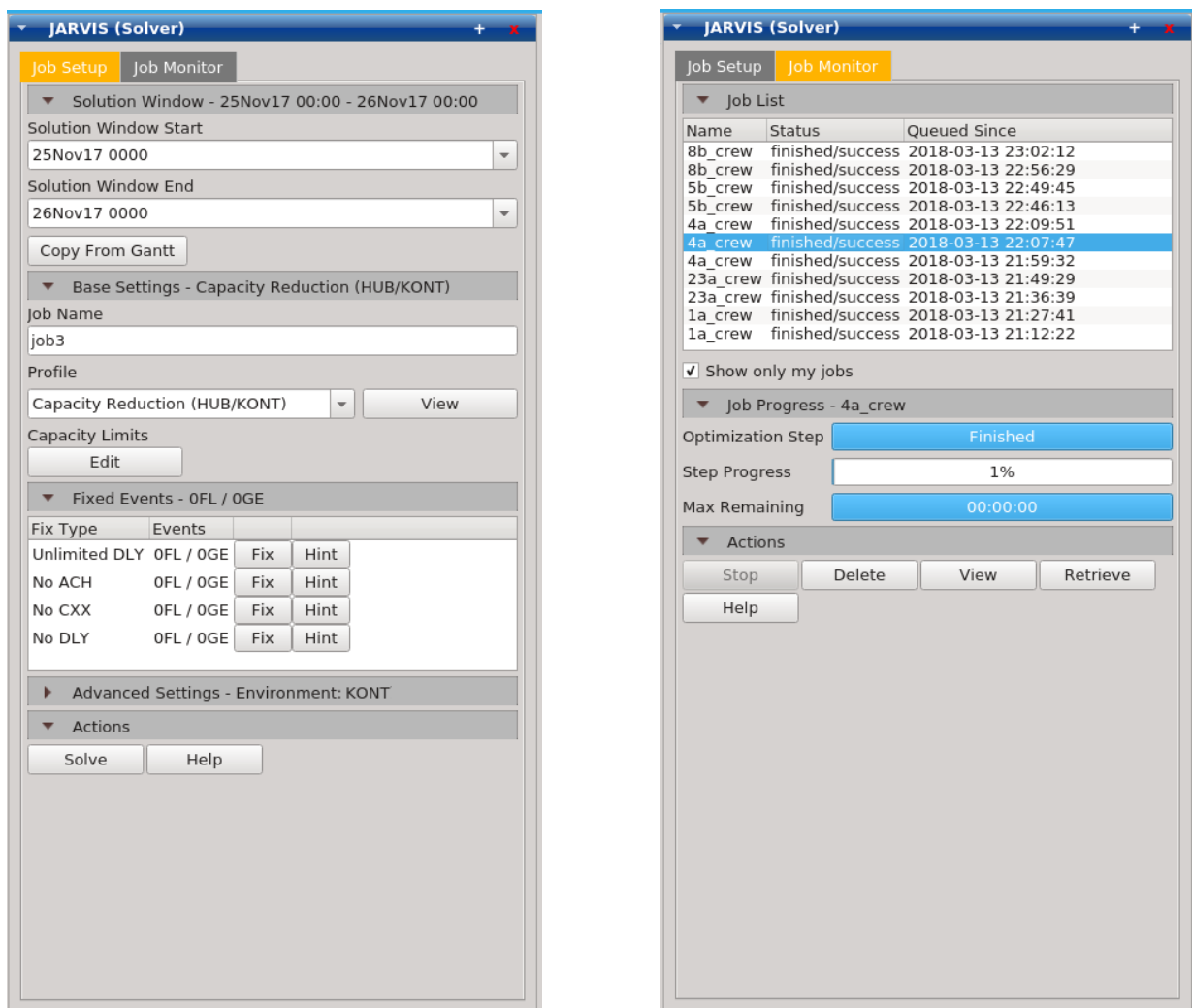


Abbildung 5.3: Die zwei Tabs des JARVIS Widgets zur Interaktion von Anwender und System

Im Setup Tab kann zum Setzen des Zeitfensters, in dem Flüge berücksichtigt werden sollen, entweder eine manuelle Eingabe gemacht werden oder über dreieckige Marker in der Gantt verfahren werden (Anforderung 30), welche in Abbildung 5.2 pink dargestellt sind. Zudem muss ein

Auftrag mit einem Namen versehen sein, so dass er wiedergefunden werden kann. Unter dem Abschnitt „Profile“ kann der Anwender dann vorkonfigurierte Ziel- und Regelparameter des GRMS auswählen, um für die verschiedenen Anwendungsfälle entsprechend die richtigen Einstellungen zu verwenden (Anforderungen 33 und 34). Dabei stehen für die verschiedenen Anwendungsfälle je nach Bedarf eine Reihe verschiedener Profile zur Verfügung, die für die Fluggesellschaft notwendige Differenzierung abbildet (nach Teilflotten, nach Flughäfen, nach Zielkriterien, etc.). Die für Anwendungsfall 2 benötigten Reduzierungen können dabei unter Capacity Limits eingegeben werden.

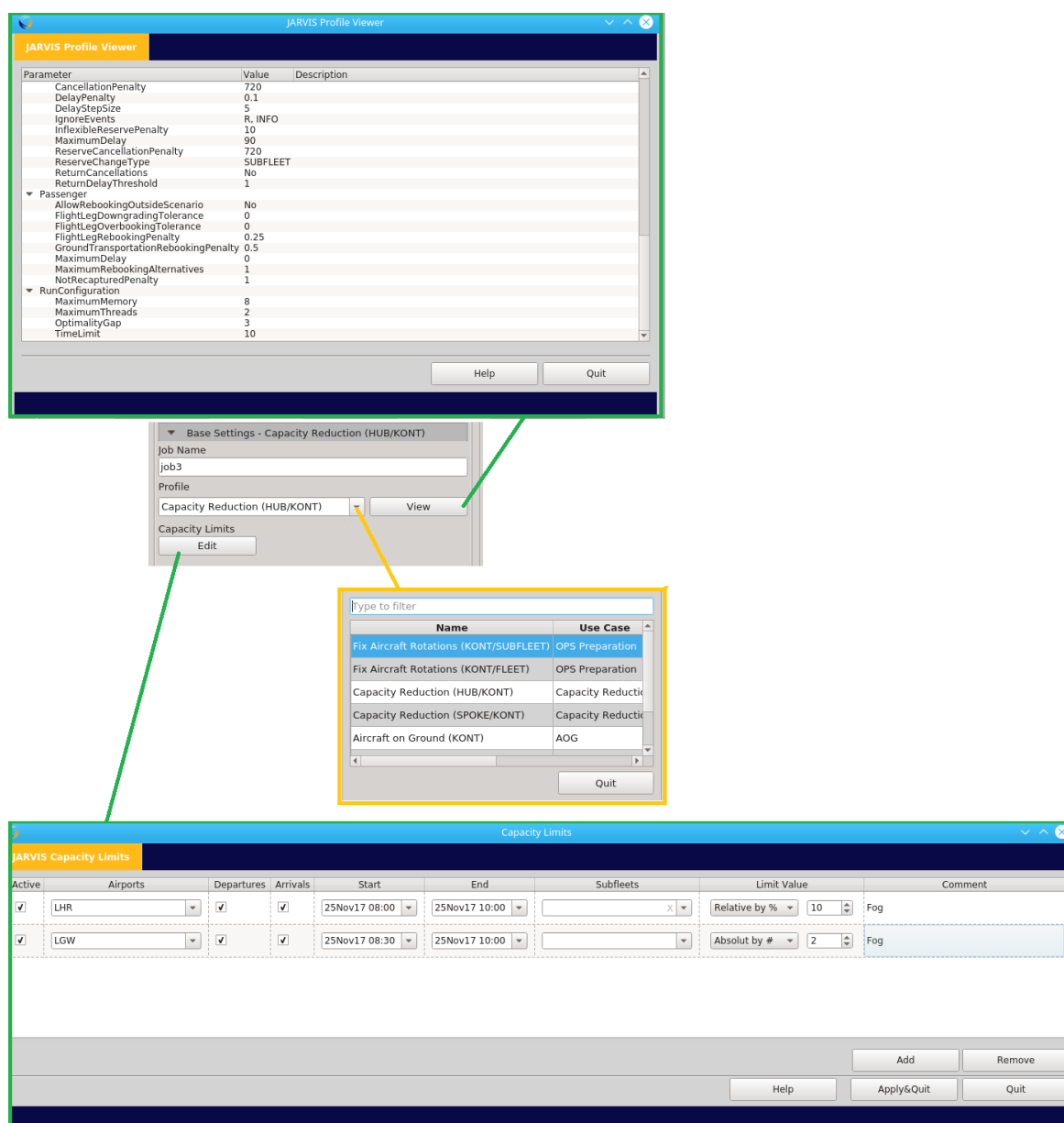


Abbildung 5.4: Profilauswahl und Eingabe von Kapazitätsreduzierungen im JARVIS Widget

Dabei darf der Anwender die Regel- und Zielparameter aus dem GRMS nicht ändern. Diese sind im Rahmen der Kalibrierungsworkshops so vorkonfiguriert, dass sie die gewünschten Ergebnisse liefern können. Insbesondere das Anpassen von sensitiven Parametern der Zielfunktion des ganzzahligen Optimierungsproblems führt sonst erwartungsgemäß zu Laufzeitproblemen. Je nach Fluggesellschaft können dabei unterschiedliche Profile und Parameter angezeigt werden.

Im Rahmen der „Fixed Events“ kann der Anwender verschiedene Aktionen, wie Streichungen oder Verspätungen für individuelle Flüge ausschließen (Anforderung 32). Diese Funktionalität ist notwendig, falls Nebenbedingungen aus anderen Dimensionen zu berücksichtigen sind.

Im Monitor Tab können laufende Aufträge mit einer suboptimalen Lösung gestoppt, Reports einzelner Aufträge angeschaut oder verglichen sowie die Ergebnisse in die Gantt eingeladen werden. Die Reports und Kennzahlen können dabei auch exportiert werden, um sie mit anderen Beteiligten in der Verkehrszentrale zu teilen.

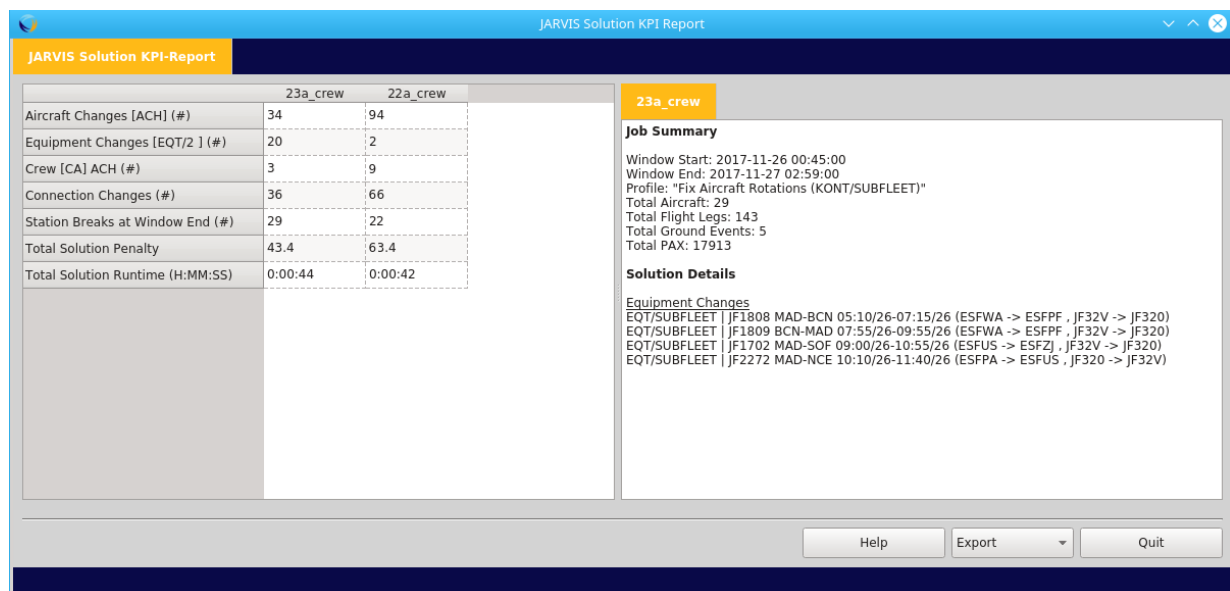


Abbildung 5.5: Statusreport und KPIs für eine generierte Lösung in JARVIS

Möchte der Anwender mehrere Lösungen parallel rechnen, so wählt er einfach im Job Setup Tab andere Profile aus und schickt weitere Aufträge an das System.

Im Prinzip liefert das Verkehrsleitsystem alle zur Entscheidung notwendigen und relevanten Stamm- und Bewegungsdaten:

- Flugzeuge mit Flottenzugehörigkeiten und technischer Beschreibung und Ausstattung sowie Sitzkonfigurationen
- Flughäfen inklusive Einschränkungen, Bodenzeiten der Flugzeuge sowie Umsteigezeiten für Crews
- Flüge mit gebuchten Passagieren sowie die Boden- und Wartungsereignisse

- Crewumläufe mit entsprechenden Qualifikationen
- Zusätzliche Flüge zur Betrachtung der Umbuchungen
- Eingaben aus der graphischen Oberfläche

Aus dem Screenshot für das Produkt von Sabre aus Abschnitt 3.2.3 kann entnommen werden, dass die graphische Oberfläche des Recovery Manager ähnlich zu dem hier vorgestellten Ansatz im Movement Manager integriert ist. Über die technische Anbindung des Entscheidungsunterstützungssystems im Hintergrund liegen aber keine Informationen vor.

5.2.2 Optimierung und Geschäftsregelmanagementsysteme

In vielen Anwendungen ist die Geschäftsfalllogik mit der Optimierungslogik so stark verflochten, dass eine Änderung der Geschäftsprozesse umfangreiche, teils tiefgreifende Änderungen in den Modellen oder Algorithmen erfordert.³²⁰ Mit einem Geschäftsregel-Managementsystems wird eine stärkere Trennung zwischen den beiden Logiken angestrebt.

Das folgende Beispiel soll diese Technik an einem einfachen, aber bisher vernachlässigten Problem veranschaulichen: Zwischen zwei Flügen muss eine minimale Bodenzeit eingehalten werden, die abhängig vom individuellen Bodenzeitenmodell der Fluggesellschaft ist. Im Optimierungsmodell repräsentiert es aber nur einen Wert in einer Ungleichung, die vereinfacht etwa lautet: $STA_{f_1} + Bodenzeit \leq STD_{f_2}$. Dabei wird dann die Bodenzeit über das GRMS exemplarisch mit `Regeln.MinBodenzeit(Flug1, Flug2, Flugzeug)` abgerufen. Dabei hat es für das Optimierungsmodell nun keinerlei Bedeutung, wie dieser Wert zustande kommt.

Im Bereich der GRMS haben sich dazu einige Softwareprodukte bereits etabliert:

- Drools (<https://www.drools.org/>)
- Red Hat JBoss BRMS (<https://developers.redhat.com/products/brms/overview/>)
- IBM WebSphere ILOG JRules (<https://www-01.ibm.com/software/integration/business-rule-management/jrules-family/about/>)

Mit OptaPlanner³²¹ und Drools gibt es prinzipiell bereits ein System, welches Optimierung und Geschäftsregel-Managementsysteme miteinander verbindet. Allerdings ist zum einen die API auf die Programmiersprache Java³²² wie bei JBoss BRMS und JRules beschränkt und zum anderen wird die Regelmaschinerie als Teil von heuristischen Algorithmen, wie bereits in Abschnitt 4.1.2.6 kurz dargestellt, direkt aufgerufen.

³²⁰ Vgl. Li et al. (2010), S. 1456.

³²¹ <https://www.optaplanner.org/>.

³²² <https://www.oracle.com/de/java/index.html>.

Da als Programmiersprache Python festgelegt ist, können die oben genannten Produkte nicht zum Einsatz kommen. Aktuell gibt es keine etablierten Produkte oder eine entsprechende, aktive Open-Source Entwicklung in Python. Deshalb wurde ein eigenes, minimalistisches GRMS in Python implementiert. Ein Hauptgrund für die scheinbar fehlenden Produkte ist sicherlich, dass Python im Gegensatz zu Java sowohl gleichermaßen als Programmiersprache und Regelbeschreibungssprache geeignet ist, so dass keine echte Separation innerhalb der Anwendung entsteht.

Die im Gegensatz zu OptaPlanner und Drools entsprechende tiefgreifende Vernetzung lässt sich mit dem entwickelten GRMS und der statischen API von Gurobi nur eingeschränkt ermöglichen. Daher wird das GRMS vorwiegend zum Aufbauen des mathematischen Modells verwendet, welches im nächsten Abschnitt formuliert wird.

5.2.3 Mathematisches Modell

Auf Grund der Analysen der Modelle und Algorithmen in Abschnitt 4.2 wird in der vorliegenden Arbeit das Modell von ANDERSSON/VÄRBRAND (2004) als Basis verwendet. Da bei diesem allerdings nur die Dimension des Flugzeugeinsatzes ohne Boden- und Wartungsereignisse berücksichtigt wird, muss es entsprechend erweitert werden. Im Beitrag von NICKKAR et al. (2015) ist das Problem zwar bereits um die Dimension Creweinsatz erweitert, welche aber nicht kompatibel zu einer Erweiterung des Flugzeugeinsatzes um die Bodenereignisse ist. Deshalb müssen auch diese Modellverbesserungen nochmals angepasst werden.

Bei den Passagierreisewegen sind im aktuellen System als Quellen nur die Buchungszahlen pro Flugsegment in den verschiedenen Sitzklassen verlässlich verfügbar, so dass die angeforderte Einbeziehung der Reisewege der Passagiere auf Grund der Daten aktuell nicht realisiert werden kann. Deshalb wird vorerst nur das mögliche Umbuchen der Passagiere auf die jeweils einzelnen Flüge beschränkt. Weitere zukünftige Erweiterungen können dem Entwicklungsplan in Abschnitt 5.2.4 später entnommen werden.

Das im folgenden Abschnitt beschriebene Modell wird in der Literatur auch als Integrated-Recovery-Problem (IRP) bezeichnet.

5.2.3.1 Mathematische Modellbeschreibung des IRP

Bevor das mathematische Modell beschrieben wird, müssen zuerst noch einige Konventionen geklärt werden:

- Start und Endzeiten werden relativ als Differenz zu einem fixen Zeitpunkt als Zahl (in Minuten) repräsentiert. Daher hat das früheste in einem Szenario den Beginn bei 0, das nächste Ereignis beispielsweise eine Stunde später dann die Startzeit bei 60.
- Variablen werden grundsätzlich klein geschrieben, allgemeine Parameter in großen Buchstaben und Mengen in geschwungener Schrift.

- Ergebnisse und Parameter des GRMS sind mit geschnörkelter Schrift versehen.
- Laufindizes sind immer nach unten gestellt, nach oben gestellte Informationen beschreiben meist eine spezielle Differenzierung der Variable, des Parameters oder der Menge.

Im Folgenden werden die einzelnen Modellentitäten beschrieben und bei den verschiedenen Aspekten bereits auf die entsprechenden Anwendungsfälle und Anforderungen verwiesen.

Eingabeparameter und -mengen:

- T^{start} \leftarrow Beginn des Lösungszeitraumes.
 T^{end} \leftarrow Ende des Lösungszeitraumes.
 \mathcal{F} \leftarrow Geplante Flugsegmente, die im Zeitraum $[T^{start}, T^{end}]$ starten oder enden.
 \mathcal{G} \leftarrow Geplante Bodenereignisse, die im Zeitraum $[T^{start}, T^{end}]$ beginnen oder enden.

Mengen:

- \mathcal{A} \leftarrow Flugzeuge, die den Flügen und Bodenereignissen aus \mathcal{F} und \mathcal{G} zugeordnet sind.
 \mathcal{P} \leftarrow Flughäfen, die Ursprung oder Ziel von Flügen aus \mathcal{F} sowie geplante Flughäfen für \mathcal{G} sind.
 \mathcal{Y} \leftarrow Zusätzliche mögliche Positionierungsflüge für Flugzeuge aus \mathcal{A} zwischen Flughäfen aus \mathcal{P} , die mittels des GRMS vorberechnet wurden.
 \mathcal{L} \leftarrow Die Menge aller möglichen Flüge im Szenario aus \mathcal{F} und \mathcal{Y} .
 \mathcal{E} \leftarrow $\mathcal{F} \cup \mathcal{G} \cup \mathcal{Y}$ die Menge aller Events.
 \mathcal{E}^{FS} \leftarrow Die Teilmenge von Events aus \mathcal{E} , welche jeweils den Start zum Zeitpunkt T^{start} für die Flugzeuge aus \mathcal{A} markieren.
 \mathcal{E}^{FE} \leftarrow Die Teilmenge von Events aus \mathcal{E} , welche jeweils das Ende zum Zeitpunkt T^{end} für die Flugzeuge aus \mathcal{A} markieren.
 \mathcal{V} \leftarrow Erzwungene Verbindungen innerhalb von \mathcal{E} .
 \mathcal{C} \leftarrow Crew Pairings/Rosters, die mindestens ein Flugsegment aus \mathcal{F} besitzen.
 \mathcal{M} \leftarrow Menge an zusätzlichen Flügen, welchen den Crews aus \mathcal{C} zugewiesen sind, die nicht in \mathcal{F} enthalten sind.
 \mathcal{K} \leftarrow Menge aller Flüge $\mathcal{F} \cup \mathcal{M}$, die den Crews aus \mathcal{C} zugewiesen sind.
 \mathcal{K}^{CS} \leftarrow Die Teilmenge von Flügen aus \mathcal{K} , welche jeweils den Start zum Zeitpunkt T^{start} für die Crews aus \mathcal{C} markieren.
 \mathcal{K}^{CE} \leftarrow Die Teilmenge von Flügen aus \mathcal{K} , welche jeweils das Ende zum Zeitpunkt T^{end} für die Crews aus \mathcal{C} markieren.
 \mathcal{S} \leftarrow Menge an möglichen Crew Positionen (Pilot, First Officer usw.).
 \mathcal{D} \leftarrow Menge an zusätzlichen Flügen, die für Umbuchungszwecke berücksichtigt werden können und nicht in \mathcal{F} enthalten sind.
 \mathcal{R} \leftarrow Reduzierung von Flugbewegungen an Flughäfen aus \mathcal{P} .
 \mathcal{L}_r^D \leftarrow Menge von allen Flügen $l \in \mathcal{L}$, die auf dem Flughafen der Reduzierung $r \in \mathcal{R}$ starten.
 \mathcal{L}_r^A \leftarrow Menge von allen Flügen $l \in \mathcal{L}$, die auf dem Flughafen der Reduzierung $r \in \mathcal{R}$ landen.

Abgeleitete Werte

- $M \leftarrow$ Eine ausreichend große, echt positive Zahl (Big-M).
 $K_a \leftarrow$ Eine natürliche Zahl, welche für jedes Flugzeug $a \in \mathcal{A}$ eindeutig vergeben ist.
 $TD_e \leftarrow$ Aktuell geplanter Startzeitpunkt eines Fluges (Off-Blocks) oder Bodenereignisses $e \in \mathcal{E} \cup \mathcal{K}$.
 $TA_e \leftarrow$ Aktuell geplanter Endzeitpunkt eines Fluges (On-Blocks) oder Bodenereignisses $e \in \mathcal{E} \cup \mathcal{K}$.
 $S_r \leftarrow$ Startzeitpunkt einer Reduzierung $r \in \mathcal{R}$.
 $E_r \leftarrow$ Endzeitpunkt einer Reduzierung $r \in \mathcal{R}$.
 $Q_{s,c} \leftarrow$ Anzahl der Crews von Position $s \in \mathcal{S}$, die dem Crew Pairing/Roster $c \in \mathcal{C}$ zugeordnet sind.
 $B_f \leftarrow$ Anzahl der gebuchten Passagiere eines Fluges $f \in \mathcal{F}$.

Parameter aus dem Regelsystem:

- $\mathfrak{F}_{e,a}^{ass} \in \{0, 1\} \leftarrow$ Ob das Event $e \in \mathcal{E}$ dem Flugzeug $a \in \mathcal{A}$ zugeordnet werden kann.
 $\mathfrak{F}_e^{cxx} \in \{0, 1\} \leftarrow$ Ob das Event $i \in \mathcal{E}$ gestrichen werden kann.
 $\mathfrak{F}_e^{dly} \in \mathbb{N}_0 \leftarrow$ Maximale Verspätung für ein Event $i \in \mathcal{E}$ in Minuten.
 $\mathfrak{F}_{e_i,e_j,a}^{con} \in \{0, 1\} \leftarrow$ Ob Event $e_i \in \mathcal{E}$ und Event $e_j \in \mathcal{E}$ nacheinander auf Flugzeug $a \in \mathcal{A}$ zugeordnet werden können.
 $\mathfrak{F}_{e_i,e_j,a}^{tat} \in \mathbb{N}_0 \leftarrow$ Minimale Turnaround-Zeit in Minuten zwischen Event $e_i \in \mathcal{E}$ und Event $e_j \in \mathcal{E}$ bei Zuordnung zu Flugzeug $a \in \mathcal{A}$.
 $\mathfrak{F}_r^{mmv} \in \mathbb{N}_0 \leftarrow$ Absolut maximal zulässige Anzahl an Flugbewegungen innerhalb der Reduzierung $r \in \mathcal{R}$.
 $\mathfrak{F}_{f,c}^{cas} \in \{0, 1\} \leftarrow$ Ob Crew $c \in \mathcal{C}$ dem Flug $f \in \mathcal{K}$ als aktiver Dienst zugeordnet werden kann.
 $\mathfrak{F}_{f_i,f_j,c}^{ccs} \in \{0, 1\} \leftarrow$ Ob der Flug $f_i \in \mathcal{K}$ und Flug $f_j \in \mathcal{K}$ nacheinander der Crew $c \in \mathcal{C}$ zugeordnet werden können.
 $\mathfrak{F}_{f_i,f_j,s}^{cct} \in \mathbb{N}_0 \leftarrow$ Minimale benötigte Umsteigezeit einer Crew der Position $s \in \mathcal{S}$ zwischen den Flügen $f_i \in \mathcal{K}$ und $f_j \in \mathcal{K}$.
 $\mathfrak{F}_{f,s,a}^{rcw} \in \mathbb{N}_0 \leftarrow$ Minimale benötigte Anzahl aktiver Crews von Position $s \in \mathcal{S}$ auf Flug $f \in \mathcal{F}$ bei Zuweisung auf Flugzeug $a \in \mathcal{A}$.
 $\mathfrak{F}_{f_i,f_j}^{rbk} \in \{0, 1\} \leftarrow$ Ob Flug $f_j \in \mathcal{F} \cup \mathcal{D}$ als Umbuchungskandidat für Flug $f_i \in \mathcal{F}$ in Frage kommt.
 $\mathfrak{F}_{f,a}^{rem} \in \mathbb{N}_0 \leftarrow$ Freie Sitze auf einem Flug $f \in \mathcal{F}$, falls Flugzeug $a \in \mathcal{A}$ zugeordnet ist.
 $\mathfrak{F}_f^{rem} \in \mathbb{N}_0 \leftarrow$ Freie Sitze auf einem Flug $f \in \mathcal{D}$.

Zielfunktionsparameter aus dem Regelsystem:

| | | |
|---|--------------|--|
| $\mathfrak{P}_e^{cxx} \in \mathbb{R}$ | \leftarrow | Kosten für das Streichen des Events $e \in \mathcal{E}$. |
| $\mathfrak{P}_{e,a}^{ass} \in \mathbb{R}$ | \leftarrow | Kosten für das Zuweisen des Event $e \in \mathcal{E}$ auf ein Flugzeug $a \in \mathcal{A}$. |
| $\mathfrak{P}_e^{dly} \in \mathbb{R}$ | \leftarrow | Kosten für das Verspäten des Events $e \in \mathcal{E} \cup \mathcal{K}$ pro Minute. |
| $\mathfrak{P}_{e_i,e_j,a}^{con} \in \mathbb{R}$ | \leftarrow | Kosten für die direkte Zuordnung von Event $e_i \in \mathcal{E}$ auf Event $e_j \in \mathcal{E}$ als direkte Verbindung auf Flugzeug $a \in \mathcal{A}$. |
| $\mathfrak{P}_{f,c}^{cas} \in \{0, 1\}$ | \leftarrow | Kosten für die Zuweisung der Crew $c \in \mathcal{C}$ auf Flug $f \in \mathcal{K}$ als aktiver Dienst. |
| $\mathfrak{P}_{f,c}^{cps} \in \{0, 1\}$ | \leftarrow | Kosten für die Zuweisung der Crew $c \in \mathcal{C}$ auf Flug $f \in \mathcal{K}$ als passiver Dienst. |
| $\mathfrak{P}_{f_i,f_j,c}^{ccs} \in \{0, 1\}$ | \leftarrow | Kosten für die direkte Zuordnung von Flug $f_i \in \mathcal{K}$ auf Flug $f_j \in \mathcal{K}$ nacheinander für Crew $c \in \mathcal{C}$. |
| $\mathfrak{P}_{f_i,f_j,c}^{cac} \in \mathbb{R}$ | \leftarrow | Kosten pro umsteigende Crew $c \in \mathcal{C}$ zwischen Flug $f_i \in \mathcal{K}$ auf einen Flug $f_j \in \mathcal{K}$. |
| $\mathfrak{P}_{f_i,f_j}^{rbk} \in \mathbb{R}$ | \leftarrow | Kosten für die Umbuchung je eines Passagiers von Flug $f_i \in \mathcal{F}$ auf einen Flug $f_j \in \mathcal{F} \cup \mathcal{D}$. |
| $\mathfrak{P}_f^{nrc} \in \mathbb{R}$ | \leftarrow | Kosten pro Passagier von Flug $f_i \in \mathcal{F}$, für den keine Umbuchungsmöglichkeit innerhalb des Lösungsfensters existiert. |

Entscheidungsvariablen:

| | | |
|------------------------------------|------|--|
| $c_e \in \{0, 1\}$ | $:=$ | Streiche Event $e \in \mathcal{E}$ |
| $x_{e,a} \in \{0, 1\}$ | $:=$ | Ordne Event $e \in \mathcal{E}$ dem Flugzeug $a \in \mathcal{A}$ zu. |
| $d_e \in \mathbb{N}_0$ | $:=$ | Verspätung des Events $e \in \mathcal{E} \cup \mathcal{K}$ in Minuten. |
| $z_{e_i,e_j,a} \in \{0, 1\}$ | $:=$ | Ordne Event $e_i \in \mathcal{E}$ dem Event $e_j \in \mathcal{E}$ als direkte Verbindung auf Flugzeug $a \in \mathcal{A}$ zu. |
| $y_{f,c}^{OD} \in \{0, 1\}$ | $:=$ | Ordne Flug $f \in \mathcal{F}$ der Crew $c \in \mathcal{C}$ als aktiven Dienst zu. |
| $y_{f,c}^{DH} \in \{0, 1\}$ | $:=$ | Ordne Flug $f \in \mathcal{F}$ der Crew $c \in \mathcal{C}$ als passiven Dienst zu. |
| $w_{f_i,f_j,c}^{SIT} \in \{0, 1\}$ | $:=$ | Ordne Flug $f_i \in \mathcal{F}$ dem Flug $f_j \in \mathcal{F}$ als direkte Verbindung für Crew $c \in \mathcal{C}$ zu, unter der Voraussetzung, dass beide Flüge dem selben Flugzeug zugeordnet sind. |
| $w_{f_i,f_j,c}^{ACH} \in \{0, 1\}$ | $:=$ | Ordne Flug $f_i \in \mathcal{F}$ dem Flug $f_j \in \mathcal{F}$ als direkte Verbindung für Crew $c \in \mathcal{C}$ zu, unter der Voraussetzung, dass sie zwischen zwei Flugzeugen wechseln müssen. |
| $r_{f_i,f_j} \in \mathbb{N}_0$ | $:=$ | Buche Anzahl von Passagieren von Flug $f_i \in \mathcal{F}$ auf einen Flug $f_j \in \mathcal{F} \cup \mathcal{D}$ um. |
| $h_{f_i} \in \mathbb{N}_0$ | $:=$ | Anzahl der Passagiere eines Fluges $f_i \in \mathcal{F}$, für die keine Umbuchungsmöglichkeit gefunden werden kann. |

Schlupfvariablen:

- $v_{r,l} \in \{0, 1\} \quad := \quad \text{Flug } l \in \mathcal{L}_r^D \cup \mathcal{L}_r^A \text{ startet oder landet vor Start der Reduzierung } r \in \mathcal{R}.$
 $i_{r,l} \in \{0, 1\} \quad := \quad \text{Flug } l \in \mathcal{L}_r^D \cup \mathcal{L}_r^A \text{ startet oder landet während der Reduzierung } r \in \mathcal{R}.$
 $n_{r,l} \in \{0, 1\} \quad := \quad \text{Flug } l \in \mathcal{L}_r^D \cup \mathcal{L}_r^A \text{ startet oder landet erst nach der Reduzierung } r \in \mathcal{R}.$

Nach Definition aller Variablen und Parameter lässt sich folgende Zielfunktion konstruieren:

$$\begin{aligned}
 \min \big(& \sum_{e \in \mathcal{E}} (\mathfrak{P}_e^{dly} d_e + \mathfrak{P}_e^{cxx} c_e + \sum_{a \in \mathcal{A}} \mathfrak{P}_{e,a}^{ass} x_{e,a}) + \sum_{e_i \in \mathcal{E}} \sum_{e_j \in \mathcal{E}} \sum_{a \in \mathcal{A}} \mathfrak{P}_{e_i, e_j, a}^{con} z_{e_i, e_j, a} \\
 & + \sum_{f \in \mathcal{K}} \sum_{c \in \mathcal{C}} (\mathfrak{P}_{f,c}^{cas} y_{f,c}^{OD} + \mathfrak{P}_{f,c}^{cps} y_{f,c}^{DH}) + \sum_{f_i \in \mathcal{K}} \sum_{f_j \in \mathcal{K}} \sum_{c \in \mathcal{C}} (\mathfrak{P}_{f_i, f_j, c}^{ccs} w_{f_i, f_j, c}^{DH} + (\mathfrak{P}_{f_i, f_j, c}^{ccs} + \mathfrak{P}_{f_i, f_j, c}^{cac}) w_{f_i, f_j, c}^{OD}) \\
 & + \sum_{f_i \in \mathcal{F}} (\mathfrak{P}_f^{nrc} h_{f_i} + \sum_{f_j \in \mathcal{F} \cup \mathcal{D}} \mathfrak{P}_{f_i, f_j}^{rbk} r_{f_i, f_j}) \big)
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Dabei müssen eine Reihe von Nebenbedingungen in Form eingehalten werden, wobei mit den inhärenten Nebenbedingungen angefangen wird. Zuerst einmal müssen die gesetzten Wertebereiche der verschiedenen Variablen durch die Vorgaben des GRMS eingehalten werden:

$$x_{e,a} \leq \mathfrak{F}_{e,a}^{ass} \quad \forall e \in \mathcal{E}, a \in \mathcal{A} \tag{5.2}$$

$$c_e \leq \mathfrak{F}_e^{cxx} \quad \forall e \in \mathcal{E} \tag{5.3}$$

$$d_e \leq \mathfrak{F}_e^{dly} \quad \forall e \in \mathcal{E} \tag{5.4}$$

$$z_{e_i, e_j, a} \leq \mathfrak{F}_{e_i, e_j, a}^{con} \quad \forall e_i \in \mathcal{E}, e_j \in \mathcal{E}, a \in \mathcal{A} \tag{5.5}$$

$$r_{f_i, f_j} \leq B_{f_i} \mathfrak{F}_{f_i, f_j}^{rbk} \quad \forall f_i \in \mathcal{F}, f_j \in \mathcal{F} \cup \mathcal{D} \tag{5.6}$$

$$y_{f,c}^{OD} \leq \mathfrak{F}_{f,c}^{cas} \quad \forall f \in \mathcal{K}, c \in \mathcal{C} \tag{5.7}$$

$$w_{f_i, f_j, c}^{SIT} + w_{f_i, f_j, c}^{ACH} \leq \mathfrak{F}_{f_i, f_j, c}^{ccs} \quad \forall f_i \in \mathcal{K}, f_j \in \mathcal{K}, c \in \mathcal{C} \tag{5.8}$$

Durch (5.9) muss jedes Event entweder genau einem Flugzeug zugeordnet oder gestrichen werden, außer es handelt es sich um einen zusätzlichen Positionierungsflug.

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} x_{e,a} + c_e = 1 \quad \forall e \in \mathcal{E} \setminus \mathcal{V} \quad (5.9)$$

Die folgenden beiden Nebenbedingungen stellen sicher, dass die Anschlussvariablen $z_{e_i, e_j, a}$ mit den Zuordnungsvariablen $x_{e_i, a}$ und $x_{e_j, a}$ verbunden werden, da im Prinzip gilt, dass wenn ein Event einem Flugzeug zugewiesen wird, dass es dann auch einen Vorgänger und Nachfolger hat (abgesehen jeweils von den Quellen und Senken).

$$\sum_{e_i \in \mathcal{E}} z_{e_i, e_j, a} = x_{e_j, a} \quad \forall e_j \in \mathcal{E} \setminus \mathcal{E}^{FS}, a \in \mathcal{A} \quad (5.10)$$

$$x_{e_i, a} = \sum_{e_j \in \mathcal{E}} z_{e_i, e_j, a} \quad \forall e_i \in \mathcal{E} \setminus \mathcal{E}^{FE}, a \in \mathcal{A} \quad (5.11)$$

Werden die beiden Nebenbedingungen (5.10) und (5.11) gleichgesetzt, so erhält man die typischen Nebenbedingungen des Flussproblems. Um sicherzustellen, dass bei einem Anschluss auch die entsprechende Bodenzeit eingehalten wird, bedarf es einer sogenannter Big-M Nebenbedingung.

$$TA_{e_i} + d_{e_i} + \sum_{a \in \mathcal{A}} \mathfrak{F}_{e_i, e_j, a}^{tat} z_{e_i, e_j, a} \leq TD_{e_j} + d_{e_j} + M \left(1 - \sum_{a \in \mathcal{A}} z_{e_i, e_j, a} \right) \quad \forall e_i \in \mathcal{E}, e_j \in \mathcal{E} \quad (5.12)$$

Dabei sind an dieser Stelle die Nebenbedingung von ANDERSSON/VÄRBRAND (2004) geschärft worden.³²³ Wurde ursprünglich die Nebenbedingung (5.12) noch für jedes Flugzeug dupliziert, kann dies durch Summieren über Verbindungsvariablen pro Event/Event-Kombination vermieden werden.

Zum Einhalten der erzwungenen Verbindungen muss mindestens ein Flugzeug diese bedienen.

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} z_{e_i, e_j, a} = 1 \quad \forall (e_i, e_j) \in \mathcal{V} \quad (5.13)$$

Um die Eingaben der Kapazitätsreduzierungen zu berücksichtigen, muss jeder betroffene Kandidat (Flug oder hinzugefügter Positionierungsflug) entweder vor, während oder nach der Reduzierung starten bzw. landen oder gestrichen werden.

$$v_{r,l} + i_{r,l} + n_{r,l} + c_l = 1 \quad \forall r \in \mathcal{R}, l \in \mathcal{L}_r^D \cup \mathcal{L}_r^A \quad (5.14)$$

³²³ Vgl. ANDERSSON/VÄRBRAND (2004), S. 77.

Die detaillierte Betrachtungsweise ist notwendig, da Flüge zeitgleich verspätet werden können. So kann zum einen ein Flug aus der Reduzierung hinaus verspätet oder durch Verspätungen in ein Intervall der Reduzierung hinein verspätet werden. Die nächsten beiden Nebenbedingungen bilden diese Aspekte ab, dass der Flug „richtig“ gezählt wird.

$$(E_r + 1 - (TD_l \mathbb{1}_{l \in \mathcal{L}_r^D} + TA_l \mathbb{1}_{l \in \mathcal{L}_r^A})) * n_{r,l} \leq d_l \quad \forall r \in \mathcal{R}, l \in \mathcal{L}_r^D \cup \mathcal{L}_r^A \quad (5.15)$$

Analog der Zuweisungs- und Verbindungsvariablen bei den Flugzeugen wird auch bei der Crew vorgegangen. Dabei wird vom vorgestellten Modell in NICKKAR et al. (2015) dahingehend abgewichen, dass Anschlussvariablen für Flugzeuge und Crews separat definiert werden.³²⁴ Damit werden zum einen nur in der Größenordnung $|E|^2(|A| + |C|)$ viele Variablen anstatt $|E|^2|A||C|$ benötigt, zum anderen lassen sich nun Bodenereignisse für ein Flugzeug zwischen den Flügen platzieren, ohne dass die Crew davon betroffen ist. Die folgende Abbildung 5.6 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

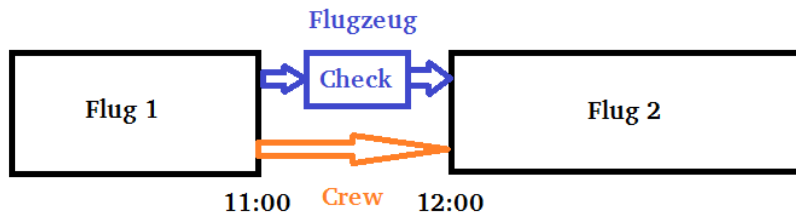


Abbildung 5.6: Konzept der separaten Anschlussvariablen für Flugzeug und Crew

Dementsprechend ergeben sich analog zu den Nebenbedingungen (5.10) und (5.11) für die Flugzeuge die folgenden beiden für die Crews.

$$\sum_{f_i \in \mathcal{K}} (w_{f_i, f_j, c}^{SIT} + w_{f_i, f_j, c}^{ACH}) = y_{f_j, c}^{OD} + y_{f_j, c}^{DH} \quad \forall f_j \in \mathcal{K} \setminus \mathcal{K}^{CS}, c \in \mathcal{C} \quad (5.16)$$

$$y_{f_i, c}^{OD} + y_{f_i, c}^{DH} = \sum_{f_j \in \mathcal{K}} (w_{f_i, f_j, c}^{SIT} + w_{f_i, f_j, c}^{ACH}) \quad \forall f_i \in \mathcal{K} \setminus \mathcal{K}^{CE}, c \in \mathcal{C} \quad (5.17)$$

Dazu muss sichergestellt sein, dass eine Crew auf einem Flug entweder einen aktiven oder passiven Dienst wahrnimmt.

$$y_{f, c}^{OD} + y_{f, c}^{DH} \leq 1 \quad \forall f \in \mathcal{K}, c \in \mathcal{C} \quad (5.18)$$

³²⁴ Vgl. NICKKAR et al. (2015), S. 25.

Außerdem darf eine Crew nur zwischen zwei Flügen sitzen bleiben, wenn auf beiden das gleiche Flugzeug zugewiesen ist.

$$-Mw_{f_i,f_j,c}^{SIT} \leq \sum_{a \in \mathcal{A}} K_a(x_{f_i,a} - x_{f_j,a}) \leq Mw_{f_i,f_j,c}^{SIT} \quad \forall f_i \in \mathcal{F}, f_j \in \mathcal{F}, c \in \mathcal{C} \quad (5.19)$$

Entsprechend müssen sie per Definition dann zwischen Flügen, welche außerhalb des Szenarios liegen, umsteigen.

$$w_{f_i,f_j,c}^{SIT} = 0 \quad \forall c \in \mathcal{C}, f_i \in \mathcal{M} \vee f_j \in \mathcal{M} \quad (5.20)$$

Anhand des Umsteigevorgangs ergeben sich die Bedingungen an die Umsteigezeiten von Crews, welche natürlich nur Anwendung finden, wenn sie das Flugzeug wechseln müssen. Ansonsten haben sie „quasi“ keine Umsteigezeit bzw. ist diese äquivalent zur Bodenzeit des Flugzeuges.

$$TA_{f_i} + d_{f_i} + (\max_{s \in \mathcal{S}} \mathfrak{F}_{f_i,f_j,s}^{cct}) w_{e_i,e_j,c}^{ACH} \leq TD_{f_j} + d_{f_j} + M(1 - w_{f_i,f_j,c}^{ACH}) \quad \forall f_i \in \mathcal{K}, f_j \in \mathcal{K}, c \in \mathcal{C} \quad (5.21)$$

Darüber hinaus dürfen die Crews einem Flug nicht zugewiesen werden, wenn er gestrichen ist.

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} y_{f,c}^{OD} + y_{f,c}^{DH} \leq M(1 - c_f) \quad \forall f \in \mathcal{F} \quad (5.22)$$

Außerdem muss sichergestellt werden, dass genug Crew mit der notwendigen Qualifikation von jeder notwendigen Position auf dem Flug zugewiesen ist, die wiederum vom zugehörigen Flugzeug abhängig sind.

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} \mathfrak{F}_{f,s,a}^{rcw} x_{f,a} \leq \sum_{c \in \mathcal{C}} Q_{s,c} y_{f,c}^{OD} \quad \forall f \in \mathcal{F}, s \in \mathcal{S} \quad (5.23)$$

Für die Passagiere wird genau dann eine Umbuchung aller Passagiere berücksichtigt, wenn der Flug gestrichen ist.

$$\sum_{f_j \in \mathcal{F} \cup \mathcal{D}} r_{f_i,f_j} + r_{h_i} = B_{f_i} c_{f_i} \quad \forall f_i \in \mathcal{F} \quad (5.24)$$

Falls umgebucht wird, dürfen dabei die neuen Flüge selbstverständlich nicht gestrichen sein und müssen über entsprechend freie Sitzplätze abhängig vom zugeordneten Flugzeug verfügen.

$$\sum_{f_i \in \mathcal{F}} r_{f_i,f_j} \leq \mathfrak{F}_{f_j}^{rem} \mathbb{1}_{f_j \in \mathcal{D}} + \left(\sum_{a \in \mathcal{A}} \mathfrak{F}_{f_j,a}^{rem} x_{f_j,a} \right) \mathbb{1}_{f_j \in \mathcal{F}} \quad \forall f_j \in \mathcal{F} \cup \mathcal{D} \quad (5.25)$$

Da die Auswahl der zu betrachtenden Flüge für die Umbuchung fix ist, ist es möglich, dass durch Verspätungen eigentlich gewisse Flüge nicht mehr in Betracht gezogen werden sollten.

Dabei sei an dieser Stelle ausdrücklich erwähnt, dass dies aktuell nur eine sehr starke Vereinfachung darstellt, welche nicht einmal die verschiedenen Sitzplatzklassen der Passagiere oder der Sitze im Flugzeug berücksichtigt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Nebenbedingungen (5.24) und (5.25) mit den entsprechenden Variablen nur eine Interimslösung darstellen.

5.2.3.2 Praktische Herausforderungen

An dieser Stelle sei erwähnt, dass es sich im vorherigen Abschnitt nur um das theoretisch formale Modell handelt, welches mit Abschluss der Forschungs Kooperation entwickelt wurde. Im Rahmen der kommerziellen Produktivnahme wurden zusätzlich Funktionalitäten implementiert, um auch Verstöße gegen die Nebenbedingungen zuzulassen. Die Technik zur Modellierung von weichen Nebenbedingungen ist in Abschnitt 4.1.1 beschrieben. Insgesamt handelt es sich dabei um folgende Funktionalitäten:

- Die Crews dürfen unter Anwendung eines Kostensatzes vorzeitig an ihrem Heimatflughafen stranden oder an ihrem Ausgangsort verweilen. Dafür sind Nebenbedingungen (5.16) und (5.17) modifiziert worden.
- Erzwungene Verbindungen dürfen unter Anwendung eines Kostensatzes aufgebrochen werden (5.13).
- Gewisse Bodenereignisse sollen auf einem Flugzeug an einem Tag nicht in Kombination auftreten. Dafür sind neue Nebenbedingungen hinzugefügt worden.
- Im Anwendungsfall 2 sollen bei ganztägigen Reduzierungen die nicht gestrichenen Flüge möglichst so auf die Flugzeuge verteilt werden, dass ganze Maschinen freigestellt werden können, um sie am Flughafen abzustellen. Beispielhaft soll lieber ein Flugzeug ganztags als zwei jeweils halbtags eingesetzt werden. Dazu sind neue Variablen, Nebenbedingungen und Zielfunktionsparameter eingeführt worden.

Bei der praktischen Implementierung muss dabei beachtet werden, dass ein solches Modell in seiner Rohform auch nur theoretisch lösbar ist. Um die notwendige Laufzeit für die praktische Anwendung ohne Verlust der Generalisierbarkeit zu erreichen, müssen einige Punkte beachtet werden:

- Iterationen über gleiche Objekte zusammenlegen
- Aufbau überflüssiger Variablen $x = 0$ und Gleichungen $\dots = 0$ unterbinden
- Notwendige Aufrufe an das GRMS auf das Minimum reduzieren

Darüber hinaus kann das Modell mit den sogenannten Presolve-Methoden von Gurobi, wie sie in Abschnitt 4.1.1.3 beschrieben sind, nochmal deutlich kompakter gemacht werden. Außerdem können gewisse Nebenbedingungen erst später im Branch-and-Cut Prozess hinzugefügt werden, da in der optimalen Lösung nur wenige dieser Bedingungen aktiv sind, um die Lösung der LP-Relaxierungen signifikant zu beschleunigen. Zudem werden Branching-Prioritäten vergeben und Teile der Variablen fixiert, um die Eigenschaften des unterliegenden Flussproblems auszunutzen, dass Teilprobleme bereits eine ganzzahlige Lösung im Rahmen der relaxierten Lösung liefern.

Außerdem sollten die Zielfunktionsparameter so gewählt sein, dass wenn keine Störung vorliegt und die Pläne gegen keine Regel verstoßen, der Zielfunktionswert der Lösung möglichst nahe an 0 ist. Am Besten sollten dabei die Parameter in der Zielfunktion alle ≥ 0 (keine Mischung von Strafwerten und Boni) sein, damit folglich auch für Zielfunktion ≥ 0 gilt. Im Rahmen der Kalibrierung hat sich herausgestellt, dass eine Mischung von Strafwerten und Boni die Kalibrierung erschwert.

5.2.4 Entwicklungsplan

Der Entwicklungsplan teilt sich im Prinzip in drei Zweige ein. Einerseits sollen im Rahmen zukünftiger Entwicklungen weitere Anwendungsfälle integriert werden.

- Für Anwendungsfall 3 und 4 zur Abdeckung von Nicht-Verfügbarkeiten der Crews müssen noch zusätzlich Eingabemaßnahmen für die Software angelehnt an das Konzept der Kapazitätsreduzierungen für Flüge definiert und in die resultierenden Einschränkungen in das Optimierungsmodell integriert werden.
- Für Anwendungsfall 8 fehlen noch Daten im Verkehrsleitsystem zur Berechnung der Kerosinkosten sowie Ergänzungen im Austauschformat und die Berechnungslogik im GRMS.
- Für Anwendungsfall 10 müssen noch entsprechende Anforderungen an der Schnittstelle zum Flughafen erarbeitet und dokumentiert sowie die entsprechende Logik im GRMS abgebildet werden.

Andererseits sollen, wie eingangs beschrieben, weitere Funktionalitäten umgesetzt werden. Dazu zählt in erster Linie das Berücksichtigen von Passagierreisewegen. Es hat sich im Rahmen der prototypischen Entwicklung allerdings herausgestellt, dass die Entwicklung ohne verfügbare Daten nahezu unmöglich ist. Deshalb müssen in einem ersten Schritt die Daten erst im System verfügbar gemacht werden, bevor mit der Erweiterung des Modells und der Implementierung begonnen werden kann. Außerdem soll in diesem Zug auch die Logik bei der Berücksichtigung der Passagierreisewege erweitert werden, so dass diese schon umgebucht werden, wenn sehr große Verspätung am Zielflughafen ihrer Reise zu erwarten sind. Für die Erweiterung des Modells um diesen Teil könnte das Konzept des Mengenüberlagerungsproblems nach Abschnitt 4.2.4 passend sein, denn am Ende gibt es in der Regel nur eine überschaubare Menge an sinnvollen Alternativen, die bei einer Umbuchung berücksichtigt werden können. Denn ein alternativer Reiseweg

sollte bevorzugt nicht signifikant mehr Flüge enthalten als vorher oder die Reisezeit deutlich verlängern sowie Flüge möglichst in derselben Sitzklasse wie ursprünglich gebucht enthalten. Zudem haben die Fluggesellschaften meist nicht alle möglichen Flüge und Kapazitäten weltweit direkt verfügbar.

Im dritten Zweig sollen die Modelleigenschaften zur Verbesserung der Performanz angepasst werden. Denn jedes hinzugekommene Feature muss umfangreich auf Auswirkungen bezüglich der Qualität und Performanz überprüft werden. Gerade durch die Einführung der umfangreichen weichen Nebenbedingungen hat sich das Problem immer mehr von einem Zulässigkeitsproblem hin zu einem Optimalitätsproblem verschoben. Damit ist es zwar einfacher, eine zulässige Lösung zu finden, aber gleichzeitig schwieriger, die Optimalität einer gefundenen Lösung zu validieren. Dazu existieren bereits einige Ideen, die genauer evaluiert werden müssen:

- Aktuell kann das Verschieben eines Bodenereignisses auf einen anderen Flughafen nur dadurch realisiert werden, dass zusätzliche Kopien für die alternativen Flughäfen angelegt werden und Nebenbedingung (5.9) dahingehend erweitert wird, dass ein Bodenereignis nur dann gestrichen wird, wenn das entsprechende Flugzeug keiner dieser Kopien zugewiesen ist. Prinzipiell wäre es vorteilhafter, dies lediglich durch eine einzelne Variable abzubilden, die modelliert, an welchem alternativen Flughafen das Bodenereignis stattfindet.
- Umbuchungsvariablen r_{f_i, f_j} könnten auf binäre Variablen umgestellt werden, um die umzubuchenden Passagiere in Gruppen zu unterteilen. Dabei würden die Gruppen so groß wie nötig aber so klein wie möglich gewählt werden. Denn oft können diese Gruppen mit entsprechender Logik ohne Verlust der Generalisierbarkeit vorberechnet werden. Kann ein Flug mit 100 Passagieren gestrichen werden und es existiert ein Folgeflug, welcher bei Durchführung mit dem aktuellen Flugzeug noch 50 verfügbare, freie Sitze hat und mit einem größeren Flugzeug sogar 80 Sitze möglich wären, so können zur Betrachtung der Umbuchung drei Gruppen mit jeweils 50, 30 und 20 Passagieren gebildet werden.
- Es ist prinzipiell auch möglich, die Variablen $z_{e_i, e_j, a}$ auf eine Variable z_{e_i, e_j}^* ohne Betrachtung des Flugzeuges zu reduzieren und durch zusätzliche Ungleichungen analog zu (5.19) sicherzustellen, dass bei Zuweisung der Verbindung beide Events mit dem gleichem Flugzeug durchgeführt werden. Dadurch wird das Modell nochmal deutlich kleiner und die Relaxierungen lassen sich deutlich schneller berechnen. Da die Nebenbedingungen (5.19) aber die relaxierten Lösungen durch die großen Ms sehr weit von der ganzzahligen optimalen Lösung liegen, tritt also der in Abschnitt 4.1.4 beschriebene Effekt ein, der zur signifikanten Verlängerung der gesamten Lösungsdauer führt. Hier besteht also Bedarf zur Suche, ob eventuell noch stärkere bzw. schärfere Nebenbedingungen existieren bzw. zusätzlich hinzugefügt werden können.

-
- Verspätungsvariablen d_e können als Summen binärer Variablen umgestellt werden, da oft keine Verspätungen im Minutenbereich erforderlich sind, sondern im 5 oder 15 Minuten Intervall.

Zuletzt sind außerdem Aktivitäten mit verschiedenen Stakeholdern im Unternehmen angestoßen worden, um zu evaluieren, wie die anderen Fluggesellschaften JARVIS in ihre Systeme integrieren können, da diese die Verkehrsleitsoftware von einem kommerziellen IT-Provider besitzen.

5.3 Auswertung und Ergebnisse

Bereits im frühen Stadium des prototypischen Entwurfs konnte beobachtet werden, dass zur Beurteilung der Reife oder Qualität ein reiner Vergleich der Lösung von JARVIS mit der von Hand generierten Lösung eines Verkehrsleiters nicht der richtige Weg ist.³²⁵ Es muss stattdessen die Performanz des Anwenders gegen die Kombination von Anwender und System gemessen werden. Dazu kann der Anwender entsprechende Vorbereitungen machen und dann unter Umständen mehrere iterative Schritte unter Einsatz der Tools durchführen, bei denen er korrigierend eingreifen kann. Nur so kann sichergestellt sein, dass die Endlösung auch umgesetzt werden kann. Um dabei die Anzahl der Iterationen durch „gute und schnelle“ Lösungen seitens JARVIS möglichst gering zu halten, müssen im Prinzip folgende Herausforderungen adressiert werden:

- Richtige Berücksichtigungsweise von Nebenbedingungen: Die mitunter größte Herausforderung ist die richtige Interpretation einzelner Aspekte für JARVIS, also ob diese als hartes oder weiches Kriterium angesehen werden müssen, und wenn als weich bewertet, wie dies in Rahmen der Zielfunktion berücksichtigt werden muss.
- Richtige Gewichtung der verschiedenen weichen Kriterien in der Zielfunktion: Bei vielen weichen Nebenbedingungen treten häufig zu vermeidende Seiteneffekte auf, so dass ein größerer Verstoß ungewollt durch in Summe zu vieler kleiner, verschiedener Verstöße kompensiert werden könnte.
- Möglichst wenig individuelle Anpassung im GRMS für einzelne Anwender:

Zur Auswertung wird daher die Zeit zur Lösungsfindung sowie die resultierende Qualität anhand der folgenden Qualitätskriterien betrachtet, wie sie auch im Report eines Optimierungsauftrages nach Abschnitt 5.2.1 dargestellt werden:

- Anzahl der Streichungen
- Anzahl und Dauer der Verspätungen
- Flugzeugwechsel intern und zwischen Teilflotten
- Anzahl und Länge von hinzugefügten Positionierungsflügen

³²⁵ Vgl. KOHL et al. (2007), S. 155.

-
- Anzahl von Crewumsteigern
 - Anzahl von Zuweisungen von Flugzeugen zu Flügen mit nicht-gewünschten technischen Einschränkungen
 - Auf andere Flughäfen verlegte Boden- oder Wartungsereignisse
 - Anzahl der Passagiere von verspäteten oder gestrichenen Flügen
 - Anzahl umgebuchter Passagiere (eventuell auch auf Bodentransport)
 - Anzahl der nicht-komplett beredeter Flüge mit Crews
 - Anzahl der zu reparierenden Crew Roster/Pairings

In den folgenden Abschnitten sollen für die in Abschnitt 5.1.1 ausgewählten Anwendungsfälle erste Ergebnisse präsentiert werden. Im Rahmen der prototypischen Phase musste unter der Limitation gearbeitet werden, dass im Testsystem nur auf eine reduzierte Anzahl von Tagen in der Vergangenheit zurückgegriffen werden kann. Die ersten, exploratorischen Tests in der Produktion haben ergeben, dass gerade die Laufzeiten für ein und denselben Anwendungsfall in gleicher Größenordnung teilweise um bis zu Faktor 2 an verschiedenen Tagen schwanken. Grund dafür ist, dass die Flugpläne jeden Tag bereits unterschiedlich genug sind. Einige Destinationen werden nur an gewissen Tagen angeflogen oder an verschiedenen Tagen zu unterschiedlichen Zeiten und mit anderen Flugzeugtypen. Daher ist es wichtig, eine entsprechende Kalibrierungs- und Testdatenbank mit möglichst vielen unterschiedlichen Szenarien über die Zeit zu schaffen.

In den folgenden Abschnitten können aufgrund unterschiedlicher Regeln im GRMS für die beiden Verkehrszentralen des Forschungspartners repräsentative Einblicke zu den Ergebnissen aus beiden Umgebungen präsentiert werden.

5.3.1 Crew-Flugzeug-Umlaufsynchronisierung

Im Rahmen dieses Anwendungsfalles, der täglich in der Nachtschicht für die Flotten der Kurz- und Mittelstrecke durchgeführt wird, ist in der Regel ein Verkehrsleiter bzw. Mitarbeiter vom Flugzeugeinsatz zwischen 30 Minuten und 2 Stunden beschäftigt. Daher bietet sich die Unterstützung dieser Tätigkeit für die Einführung eines Systems besonders an. So haben die Mitarbeiter die Möglichkeit, das System zur Reduzierung der Arbeitslast täglich einzusetzen und um sich zugleich mit den Funktionen vertraut zu machen.

Dabei werden für die Optimierung die Flotten auf der Kurz- und Mittelstrecke betrachtet, da die Crews im Rahmen einer Schicht mehrere Flüge absolvieren. Dabei werden verschiedene Flotten zusammengefasst betrachtet, wenn sie die gleiche Anforderung an die Crew besitzen und daher untereinander problemlos getauscht werden kann. Zum Beispiel sind oft Flugzeuge eines Typs mit und ohne sogenannte Winglets oder Sharklets³²⁶ meist in zwei Flotten geteilt, können aber

³²⁶ Winglets oder Sharklets bezeichnen die meistens nach oben verlängerten Außenflügel zur Einsparung einiger Prozent des Kerosinverbrauchs gerade auf den Mittelstrecken.

aus Sicht der Crew nahezu äquivalent getauscht werden. Abbildung 5.7 zeigt dabei den Crewweinsatzplan zu einem selektierten Flug im Verkehrsleitsystem. Dabei ist zu erkennen, dass die beiden Crewumläufe (Cockpit und Kabine) zwischen dem ersten und zweiten Flug umsteigen müssten und dafür 10 Minuten zu wenig Zeit haben. Es würde sich also anbieten, wenn der nächste und die restlichen Flüge ebenfalls auf dem Flugzeug stattfinden, auf dem sie bereits den Flug durchgeführt haben.

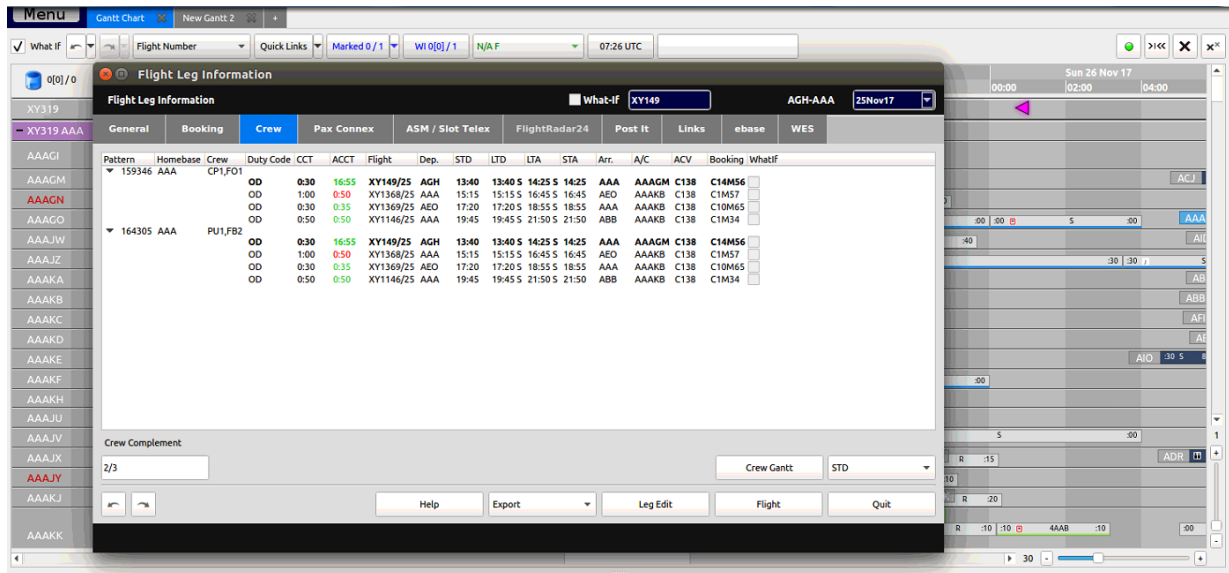


Abbildung 5.7: Anzeige der Crewweinsatzpläne im bestehenden Verkehrsleitsystem

Da die Ausgangsbasis in diesem Fall keine Störung darstellt, welche im Testsystem durch Modifizierung der Daten künstlich erstellt werden kann, muss auf den gegebenen Daten im Testsystem gearbeitet werden. Daher ist die Auswertung auf zwei verfügbare Tage beschränkt. Außerdem werden nur die Umläufe des Pilot in Command (PIC), also des Kapitäns, angepasst und nur dann, wenn er für den Umstieg weniger als eine festgelegte Zeit hat. Es dürfen nur kleine Verspätungen der Flüge von maximal 5 Minuten durchgeführt werden.

Für Verkehrszentrale A wird diese Aufgabe für insgesamt 6 Flotten nacheinander durchgeführt, wobei 1 separat, 2+3 integriert, 4 separat und 5+6 integriert betrachtet werden.

| | Flotte 1 | Flotte 2+3 | Flotte 4 | Flotte 5+6 |
|---------------|----------|------------|----------|------------|
| Flugzeuge | 15 | 36 | 10 | 43 |
| Flüge (Tag 1) | 103 | 190 | 57 | 98 |
| Flüge (Tag 2) | 108 | 195 | 50 | 153 |

Tabelle 5.1: Ausgewählte Flotten und Flüge für die Crew-Flugzeug-Umlaufsynchronisierung

Während für die manuelle Lösung direkt losgelegt werden kann, müssen für die Bearbeitung mit JARVIS entsprechende Vorbereitungen der Ausgangssituation pro Flottenkombination (Filterungen der Flugzeuge, Setzen des Zeitraumes und Auswahl der richtigen Profiles, Fixierungen

und Adjustierungen) durchgeführt werden. Auch müssen gewisse Zeiten für das Betrachten des Reports eines Jobs, die Inspektion einer oder mehrerer Lösungen sowie händische Anpassung im Flugplan durch den Anwender eingeplant werden. Die folgende Auswertungen aus Tabellen 5.2 und 5.3 zeigen, dass sich JARVIS in jeder Teilaufgabe vorteilhaft einsetzen lässt. Die verschiedenen Zeiten sind dabei in Sekunden erfasst.

| | Flotte 1 | Flotte 2+3 | Flotte 4 | Flotte 5+6 |
|------------------------------------|----------|------------|----------|------------|
| Ursprüngliche Umsteiger | 10 | 25 | 2 | 18 |
| Vorbereitungszeit | 25s | 58s | 27s | 43s |
| Laufzeit JARVIS | 7s | 293s | 2s | 80s |
| Ergebnis JARVIS (Verbl. Umsteiger) | 0 | 4 | 2 | 5 |
| Manuelle Nachbearbeitungszeit | 43s | 474s | 93s | 67s |
| Endergebnis (Verbl. Umsteiger) | 1 | 4 | 2 | 4 |
| Bearbeitungszeit mit JARVIS | 75s | 825s | 122s | 190s |
| Umsteiger manuelle Lösung | 1 | 4 | 2 | 4 |
| Dauer manuelle Lösung | 123s | 835s | 139s | 413s |
| Zeitliche Verbesserung (Faktor) | 1,64 | 1,01 | 1,14 | 2,83 |

Tabelle 5.2: Auswertung des Einsatzes von JARVIS für das Synchronisieren von Flugzeug und Crew für Tag 1

| | Flotte 1 | Flotte 2+3 | Flotte 4 | Flotte 5+6 |
|------------------------------------|----------|------------|----------|------------|
| Ursprüngliche Umsteiger | 7 | 30 | 1 | 15 |
| Vorbereitungszeit | 27s | 53s | 26s | 49s |
| Laufzeit JARVIS | 5s | 300s | 2s | 330s |
| Ergebnis JARVIS (Verbl. Umsteiger) | 0 | 7 | 1 | 9 |
| Manuelle Nachbearbeitungszeit | 28s | 132s | 18s | 67s |
| Endergebnis (Verbl. Umsteiger) | 0 | 5 | 2 | 7 |
| Bearbeitungszeit mit JARVIS | 60s | 485s | 46s | 446s |
| Umsteiger manuelle Lösung | 0 | 5 | 2 | 8 |
| Dauer manuelle Lösung | 110s | 697s | 54s | 388s |
| Zeitliche Verbesserung (Faktor) | 1,84 | 1,43 | 1,17 | 0,86 |

Tabelle 5.3: Auswertung des Einsatzes von JARVIS für das Synchronisieren von Flugzeug und Crew für Tag 2

Der Anwender durfte sich dabei vorher mit dem Datensatz vertraut machen, bevor zuerst eine manuelle Lösung und im Anschluss eine Lösung in Verwendung mit JARVIS erzeugt wurde. Dabei muss an dieser Stelle gesagt sein, dass mit einem bereits im Umgang mit JARVIS erprobten Anwender die Fälle durchgeführt wurden, so dass dieser bereits das Tool effektiv nutzen konnte. Unerfahrene Anwender werden in der Anfangszeit sicherlich längere Laufzeiten verursachen.

Interpretiert man die Ergebnisse aus den Tabellen 5.2 und 5.3, so ergeben sich an beiden Tagen in Summe schnellere Prozesszeiten bei mindestens gleichbleibender Qualität (Anzahl der verbleibenden Umstiege). Dabei sind folgende Beobachtungen zu machen:

1. Der Anwender hat an Tag 1 bei Flotte 1 eine bessere Lösung als JARVIS generiert, da er gegen dessen harte Vorgaben verstoßen hat.
2. Der Anwender hat an Tag 1 bei Flotte 2+3 das Ergebnis von JARVIS wieder verschlechtert, da ein nicht berücksichtigter, selten auftretender Aspekt eingearbeitet werden musste.
3. Der Anwender hat den JARVIS Lauf an Tag 2 auf Flotte 2+3 nach 5 Minuten bei einer relativen Gap von 30% gestoppt und händisch nachgebessert.
4. Der Anwender konnte für Tag 2 in Kombination mit JARVIS eine bessere Lösung als rein manuell erzeugen, benötigte dafür auch etwas mehr Zeit.

Auch ist zu beobachten, dass meist noch eine größere Nacharbeitung fällig ist. Dabei besteht diese zum größten Teil daraus, die Ergebnisse von JARVIS zu validieren. Dies Zeitspanne sollte mit dem Aufbau von Vertrauen in das Tool zukünftig weiter gesenkt werden. Außerdem können nun die Fälle zum Teil parallel bearbeitet werden, um die Geschwindigkeit noch weiter zu erhöhen. Während JARVIS Lösungen für die Flotten 2+3 sowie 5+6 berechnet, können derweil Flotten 1 und 4 schon manuell nachgearbeitet werden.

5.3.2 AOG

Im Rahmen der selektierten Anwendungsfälle unterstützt JARVIS auch bei der Ermittlung einer Lösung für ein AOG eines Flugzeugs. Im Falle einer Meldung seitens des Piloten oder der Technik wird ein entsprechendes Bodenereignis (in hellblau) für das defekte Flugzeug mit der erwarteten Dauer in das System der Flugzeugeinsatzsteuerung eingetragen. Abbildung 5.8 stellt die entsprechende Situation in der Gantt-Chart für die Verkehrszentrale A dar.

In der beschriebenen Situation hat das Flugzeug mit dem Kennzeichen AAAOQ direkt nach dem ersten Flug einen Schaden erlitten, dessen Behebung vermutlich etwa 12 Stunden andauern wird. Entsprechend müssen die ursprünglich geplanten Flüge auf andere Flugzeug verteilt oder im schlimmsten Fall gestrichen werden. Abbildung 5.9 zeigt eine mögliche Lösung, wobei ein Flug (in gelb) aufgrund einer jetzt umsteigenden Crew verspätet wurde.

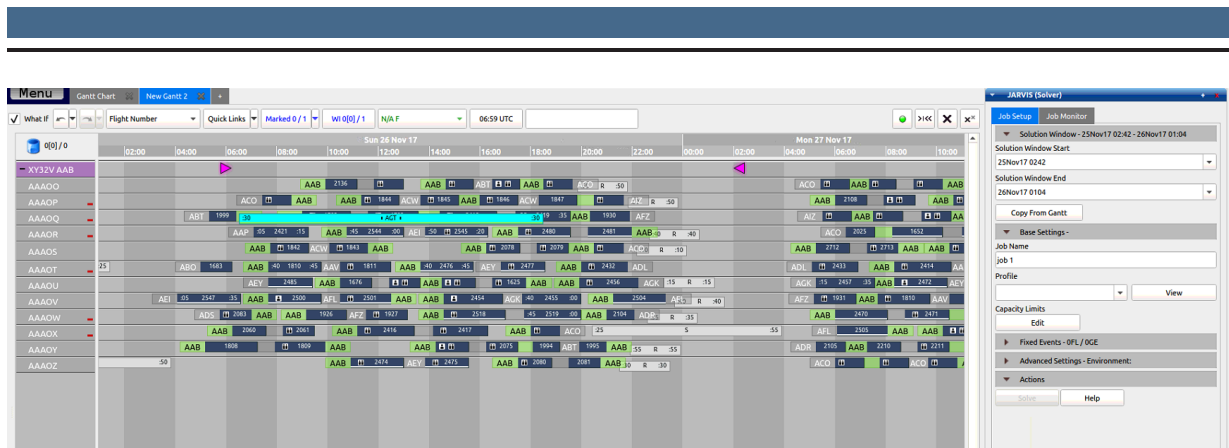


Abbildung 5.8: Darstellung eines AOG in der Gantt-Chart

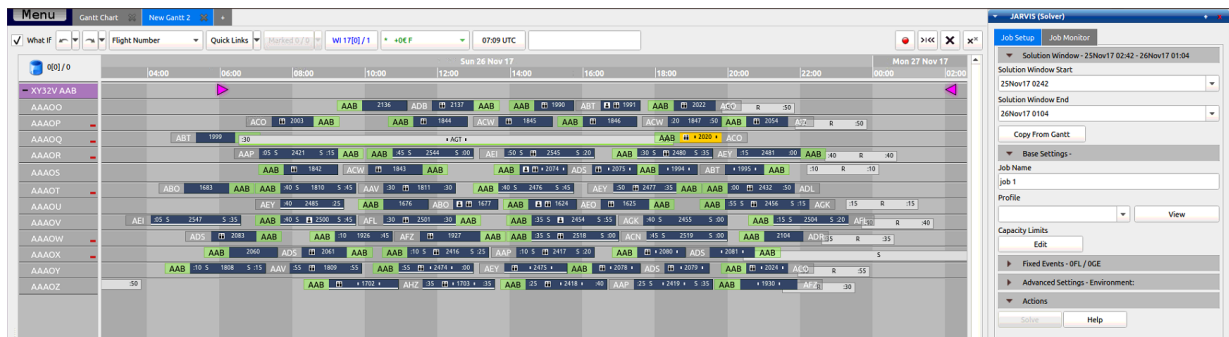


Abbildung 5.9: Lösung für ein Flugzeug mit AOG dargestellt in der Gantt-Chart

Auch hier ergeben sich große Unterschiede zwischen verschiedenen Flotten. Während für die Kurz- und Mittelstrecke solche Szenarien meist erstmal für den nächsten Tag gelöst werden, auch wenn das AOG Event möglicherweise noch länger dauert, müssen für die Langstreckenflugzeuge meist 3-4 Tage in die Betrachtung inkludiert werden, bis ein solcher Ausfall wieder aufgefangen ist. Dabei macht der größere Zeitraum das Problem nicht kompliziert, da im Bereich der Langstrecke natürlich weniger Flüge liegen. Eine Langstreckenflotte mit 12 Flugzeugen fliegt über 3 Tage hinweg etwa 61 Flüge, während eine Kurzstreckenflotte mit 12 Flugzeugen 73 Flüge am Tag absolviert.

Nach Abschnitt 3.2.1 wird das Problem der AOGs in knapp 50% der Forschungsbeiträge zur Auswertung der Performanz verwendet. Meistens wird dabei nur eine Flotte betrachtet. Allerdings steht diese Aussage meist vor den Hintergrund, dass das entwickelte Modell nicht für mehrere Teilflotten ausgelegt ist. In der Praxis wird zwar meistens zum Tauschen nur die Teilflotte des defekten Flugzeuges betrachtet, oft werden jedoch auch zusätzliche Flugzeuge aus anderen Flotten zur Problemlösung mit einbezogen. Wird beispielsweise in Betracht gezogen, einen geplanten Airbus A380 gegen eine Boeing B747 auf einem Flug als Ersatz zu tauschen, so müssten zusätzlich 20 Mitarbeiter für Cockpit und Kabine eingesetzt werden, da die geplante A380 Crew auf Grund ihrer Qualifikation die 747 nicht fliegen darf.

Schaut man sich das Beispiel aus Abbildung 5.8 an, so gibt es keine dedizierte Reservekapazität. Hätte JARVIS eine Flugstreichung vorschlagen, so würde der Verkehrsleiter für einen nächsten Auftrag weitere geeignete Flugzeuge als Tauschmöglichkeit zur Problemstellung hinzufügen. Dabei liefert JARVIS auf der im Projekt bisher geschaffenen Kalibrierungsdatenbank im Durchschnitt Ergebnisse im einstelligen Sekundenbereich. Daher zählt der AOG Fall zu den eher einfacheren Problemen.

5.3.3 Kapazitätsreduzierungen

Im Folgenden soll gezeigt werden, dass Kapazitätsreduzierungen sehr unterschiedlich zu betrachten sind. Dafür ist aus der Kalibrierungsdatenbank ein repräsentativer Fall für Verkehrszentrale B ausgewählt worden, an dem dies gut zu verdeutlichen ist.

Für den ausgewählten Tag ist um 09:00 Uhr Lokalzeit bekanntgegeben worden, dass von 10:00 bis 14:00 Uhr auf Grund eines aufkommenden Gewitters die Anzahl der Abflüge am Hubflughafen reduziert werden muss. Am Ende des Tages sollen aber die Effekte der Störung wieder eingefangen sein. Zur Betrachtung werden 3 Teilflotten a insgesamt 47 Flugzeugen mit 194 Flugzeugen und 25 Bodenereignissen geladen. Dabei sind auf den Flügen insgesamt 20600 Passagiere gebucht. Dabei sind 31 Abflüge im Zeitraum von 10:00 bis 14:00 Uhr geplant. In Tabelle 5.4 sind nun die Ergebnisse der verschiedenen Kapazitätsreduzierungen in 10% Schritten dargestellt. Die Reduzierungen werden dabei gemäß Abbildung 5.4 eingegeben. Als Rahmenbedingung für Verspätungen sind 60 Minuten pro Kurzstreckenflug zugelassen und 120 pro Mittelstrecke, die relative Optimalitätslücke liegt bei unter 1%.

| Reduzierung | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | 100% |
|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Streichungen | 0 | 4 | 10 | 18 | 24 | 30 | 38 | 44 | 54 | 58 |
| Verspätungen (Anzahl) | 3 | 5 | 7 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| Verspätungsminuten | 100 | 265 | 280 | 275 | 310 | 340 | 320 | 350 | 345 | 510 |
| Flottenübergreifende Täusche | 0 | 5 | 7 | 11 | 17 | 21 | 18 | 20 | 21 | 19 |
| Passagiere gestrichener Flüge | 0 | 349 | 922 | 1685 | 2243 | 2949 | 4002 | 4806 | 5643 | 6567 |
| Anteil zeitnah umbuchbarer Passagiere | - | 100% | 54% | 35% | 35% | 30% | 23% | 20% | 19% | 16% |
| Laufzeit JARVIS | 54s | 73s | 104s | 71s | 51s | 44s | 41s | 38s | 41s | 22s |

Tabelle 5.4: Auswertung der Laufzeit und Qualität von JARVIS in Reduzierungsszenarien

Obwohl nur 31 Abflüge im relevanten Zeitraum stattfinden, lässt sich die hohe Anzahl der Annullierungen in einem Hub-und-Spoke Netzwerk dabei schwer vermeiden, da auf die Streichung des Hinfluges vom Hub zu einen Spoke-Flughafen auch oft die des Rückfluges zum Hub folgt.

Tabelle 5.4 lässt erkennen, dass die Szenarien ab 50% deutlich einfacher zu lösen sind. Betrachtet man dazu die umbuchbaren Passagiere, so ist ab 40% die noch freie Kapazität auf den übrigen Flügen aufgebraucht. Dann müssen mit zunehmender Reduzierungsrate auch die vollen oder schlecht umbuchbaren Flüge gestrichen werden. Dass zwischen 90 und 100% die Lösung nochmal einen Sprung in den Verspätungen macht und sehr schnell gefunden wird, zeigt einen weiteren typischen Effekt, der sich in den Daten ebenfalls beobachten lässt. Da insgesamt 10 Flugzeuge abends jeweils ein Wartungsereignis haben, muss sichergestellt sein, dass diese auch durchgeführt werden können. Falls im Zeitraum der Reduzierung keine Flugzeug mehr starten, existieren daher auch keine Abtauschmöglichkeiten mehr und die einzige Lösung ist das Verspäten, um die Wartung zu erreichen.

Oft werden in der wissenschaftlichen Literatur nur ausgewählte Fälle getestet, wie etwa eine Reduzierung von 50% und 100%. Die komplexeren Aufgaben liegen aber im deutlich kleineren Bereich und insbesondere die Lösung zu einer Schließung weist oft spezielle Charakteristika auf. Deshalb müssen differenzierte Szenarien betrachtet werden. Später in Abschnitt 5.3.5 wird der Vergleich gegenüber der Literatur nochmals an einem anderen Beispiel diskutiert.

5.3.4 Kaskadierende Effekte minimieren

Der Anwendungsfall steht in direkter Verbindung mit den in Abschnitt 2.1.4.2 erwähnten Methoden zur robusten Flugplanung. Je nachdem gegen welche Einflüsse oder Störungsgrößen ein Flugplan robust geplant ist und für welche operativen Maßnahmen dieser optimiert ist, kann er andere Ursachen wiederum nicht effizient abfedern.

Wie auch schon in den vorherigen Abschnitten lässt sich dies am besten an einem repräsentativen Beispiel aus der Kalibrierungsdatenbank darstellen. Dafür wurden 2 Teilflotten mit insgesamt 43 Flugzeugen ausgewählt, die über entsprechende Reserven verfügen. Dabei wurden gegen Nachmittag die in Tabelle 5.5 stehenden Muster von jeweils 20 Stunden (1200 Minuten) an Verspätung zufällig auf verschiedene Flüge eingespielt, die bis zum Nachtflugverbot am Abend wieder eingeholt werden müssen. Dabei sollten verursachte Folgeverspätungen maximal 60 Minuten bei Kurzstreckenflügen betragen, bei Mittelstrecken entsprechend 120 Minuten. Dafür stehen am späten Nachmittag und Abend zusätzlich zwei Flugzeuge mit jeweils 5 Stunden Reserve zur Verfügung.

Auf den ersten Blick könnte der Einsatz der Reserven rein rechnerisch in Summe 10h der Verspätung absorbieren. Im ersten Muster wird aber klar, dass der Flugplan zusätzlich sehr robust gegen kleinere Verspätungen geplant ist, denn es kommen zu den 1200 Minuten initialen Verspätungen nur insgesamt 515 Minuten an Folgeverspätung mit Auflösung einer Reserve hinzu. Je länger

und je mehr längere Verspätungen existierten, desto eher wird die zweite Reserve eingesetzt, um die Verspätung zu absorbieren.

| Verteilung | Restverspätung | Verbrauchte Reserven | Flugstreichungen | Laufzeit |
|------------------|----------------|----------------------|------------------|----------|
| 20 x 1h | 515min | 1 | 0 | 300s |
| 10 x 1h + 5 x 2h | 355min | 1 | 4 | 52s |
| 10 x 2h | 100min | 2 | 2 | 41s |
| 5 x 4h | 0min | 2 | 0 | 39s |

Tabelle 5.5: Auswertung der Lösungsqualität von JARVIS zum Auflösen von verschiedenen Verspätungsszenarien

Der beschriebene Effekt kommt daher, dass die Fallstudienairline ihre Reserven nicht zum Auffangen von kleinen Verspätungen nutzen möchte, sondern lieber ihren Flugplan am Nachmittag etwas durch Flugstreichungen ausdünn, bei denen die Passagiere eine gute Alternativmöglichkeit besitzen. So können die Reserven zur Abdeckung defekter Flugzeuge am Abend genutzt werden. Im ungünstigsten Fall wird vor dem Nachtflugverbot eine Maschine technisch unklar gemeldet und der Flug muss auf den nächsten Morgen verschoben werden und die Fluggäste solange in einem Hotel untergebracht werden. Am Ende obliegt es natürlich dem Verkehrsleiter, die zweite Reserve aufzulösen, um mögliche Flugstreichungen zu vermeiden.

5.3.5 Vergleichbarkeit mit Ergebnissen in der Literatur

Prinzipiell ist ein Vergleich verschiedener Ergebnisse zwischen den einzelnen Beiträgen nahezu nicht möglich, da in der Regel keine Rohdaten der getesteten Szenarien vorliegen. Die angegebenen Größenordnungen wie Anzahl der Flüge oder Flugzeuge geben nur einen groben Indikator sowie die beschriebenen Störungen, wie komplex ein Szenario tatsächlich ist. Dabei soll folgendes Beispiel nochmals zeigen, wie groß die Unterschiede trotz gleich scheinender Eingabedaten sein können.

Es wird exemplarisch eine kleine Teilflotte von 21 Flugzeugen mit 108 Flügen und 15 Bodenergebnissen aus Verkehrszentrale B betrachtet. Im Beitrag von PETERSEN et al. (2012) wird als Teil der Untersuchung eine Schließung eines Flughafens über eine Stunde am Morgen getestet.³²⁷ Wird dabei das Intervall um \pm eine Stunde verschoben und löst JARVIS dieses Problem am Hub für die selektierte Teilflotte, so zeigt Tabelle 5.6, dass sich die Laufzeiten um das zehnfache unterscheiden. Dies erklärt sich damit, dass das Intervall von 08:00-08:59 (UTC) eine Umsteigewelle am Hub schneidet und daher besonders viele Flüge betroffen sind. Die Experimente wurden dabei auf einem MacBook Pro durchgeführt, wobei nur maximal zwei physische CPU Kerne und 8GB Hauptspeicher pro Lauf verwendet wurden.

³²⁷ Vgl. PETERSEN et al. (2012), S. 497.

| Uhrzeit (UTC) | Laufzeit | Streichungen | Summe der Verspätungen | Flugzeugwechsel |
|---------------|----------|--------------|------------------------|-----------------|
| 07:00-07:59 | 12s | 0 | 380min | 16 |
| 08:00-08:59 | 117s | 2 | 730min | 20 |
| 09:00-09:59 | 19s | 0 | 295min | 30 |

Tabelle 5.6: Ergebnisse von verschiedenen Szenarien einer einstündigen Schließung des Hubs für eine Teilflotte in JARVIS mit maximal 60 Minuten Verspätung pro Flug.

Zudem sind die Laufzeiten insbesondere abhängig von den maximal zulässigen Verspätungszeiten, welche bei nicht angepasster Wahl die Komplexität steigert.

Einzig die Beiträge, welche auf den Datensätzen der ROADEF Challenge 2009 arbeiten, würden eine gewisse Vergleichbarkeit der Lösungsqualität zwischen einzelnen Ergebnissen ermöglichen. Allerdings unterscheidet sich meist die der Auswertung zugrunde liegende Hardware, so dass nur annähernde Vergleiche bezüglich der Lösungszeit durchgeführt werden könnten. Ohnehin bleibt dabei unberücksichtigt, ob die Anwender ein in der Literatur vorgeschlagenes Lösungsszenario als Ausgangsbasis für eine Entscheidung nutzen würden.

5.4 Einführung in den Betrieb

Der Forschungspartner rechnet analog zu den Erkenntnissen in Abschnitt 3.4, dass das System nach Einführung ebenfalls in der Größenordnung zwischen 0.5 und 1% des Umsatzes als Ersparnis ausweisen kann, wobei die Implementierungs- und Betriebskosten dabei schon berücksichtigt sind. Ein großer Teil der zukünftig angepeilten Ersparnisse soll durch die bessere Berücksichtigung der Passagierumsteiger erzielt werden. Denn gerade in größeren Störsituation können nur ein Bruchteil der mehreren zehntausend Umsteiger am Tag durch die Mitarbeiter in der Verkehrszentrale genauer in Prozess der Lösungsfindung berücksichtigt werden. Darüber hinaus soll durch schnellere Lösungsgenerierung die Spitzenbelastung der Mitarbeiter gesenkt werden.

Allerdings ist auch bewusst, dass eine Reihe von Herausforderungen für den Betrieb anzugehen sind, um die Ziele zu erreichen. Im Folgenden sind daher die wichtigsten Aspekte geschildert:

Datenpflege

Oft wird die fehlende Datenverfügbarkeit in Verbindung mit Entscheidungsunterstützungssystemen gebracht. Im Falle von JARVIS ist dies prinzipiell ein geringeres Problem. Ein viel größeres Problem stellt die korrekte Datenpflege dar. Die folgenden beiden Beispiele sollen das Problem aufzeigen:

- Im Verkehrsleitsystem gibt es einen Mechanismus, um verschiedene Einschränkungen auf Flugzeuge zu definieren, damit sie gewissen Flügen nicht zugeordnet werden. Leider werden einige dieser Eigenschaften und Zuordnungen nicht vollständig gepflegt oder repräsentieren nicht exakt die zu berücksichtigende Eigenschaft.

-
- Bodenereignisse werden von vornherein länger oder früher geplant als es tatsächlich notwendig ist. Dies führt dazu, dass eigentlich freie Lücken auf einem Flugzeug im System belegt sind.

Meist gehören die praktizierten Vorgehensweisen zur Kategorie „Haben wir schon immer so gemacht“. Auch wenn es sich aus Sicht der Anwender nur um „Kleinigkeiten“ handelt, produziert das System in diesen Fällen regelmäßig „unerwartete“ Lösungen. Um ein solches Tool benutzen zu können, müssen die Daten auch die Handlungsoptionen korrekt abbilden.

Training der Anwender

Im Rahmen der Kalibrierungswrkshops mit den Anwendern hat sich herausgestellt, dass die Anwender ein großes Problem damit haben, wenn eine „unerwartete“ Lösungen zurückgeliefert wird. Oft wissen Sie nicht, an welchen Stellschrauben gedreht werden muss, um ein besseres Ergebnis zu erhalten. Besonders das Setzen des Zeithorizontes T^{start} und T^{end} stellt eine große Herausforderung dar. Außerdem löst das Modell natürlich alle Unzulässigkeiten innerhalb des Zeitraums. Kommen die oben beschriebenen Probleme der nicht gepflegten Daten hinzu, auf welche der Anwender nicht sensibel achtet, muss er aus seiner Sicht die Nadel im Heuhaufen suchen. Deshalb benötigen die Anwender ein gewisses Verständnis für die „Arbeitsweise“ für das Tool und dessen Rahmenbedingungen, unter denen das System „arbeitet“.

Langzeitkalibrierung

Das in Abschnitt 5.3.5 vorgestellte Beispiel der Laufzeitschwankungen für fast identische Probleme lässt es prinzipiell schon erahnen, dass eine umfangreiche Kalibrierungsdatenbank aufgebaut werden muss. Diese ist auch notwendig, um neue Entwicklungen sofort auf mögliche Veränderungen in der Laufzeit hin zu testen. Bis ein System vollständig kalibriert ist und solche Schwankungen minimiert sind, werden noch mehrere Monate nach Produktivnahme vergehen. Auch darauf müssen die Anwender vorbereitet werden.

5.5 Zusammenfassung

Mit der Entwicklung von JARVIS konnte gezeigt werden, dass zum einen die Modelle aus der Literatur um viele Funktionen für den praxistauglichen Bedarf erweitert und detailliert werden müssen. Darüber hinaus wurden auch die technischen Details der Implementierung diskutiert, die eine flexible Integration in nahezu jede beliebige Applikation ermöglichen. Der Einsatz vieler Standardtechnologien sorgt dabei für die zukünftige Tragfähigkeit eines solchen Systems. Auch zur Vorgehensweise der Entwicklung konnte ein generisches Konzept dargestellt werden, mit dem solche Systeme zukünftig näher an oder mit den Unternehmen gestaltet werden.

Zudem hat sich gezeigt, dass die Modelle und Algorithmen nur einen Teil des Puzzles darstellen, der zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems notwendig ist. Erst die weiteren, gleichwertigen Puzzleteile der bestehenden IT-Systeme, Entscheidungsprozesse und Zusammenspiel von Anwender und System vervollständigen das Bild. Mit all diesen Erkenntnissen und Gestaltungsmaßnahmen ist somit auch die vierte Forschungsfrage beantwortet worden.

6 Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit konnten die verschiedenen Teile des übergeordneten Forschungsziels vollständig erreicht werden. In Kapitel 2 wurden zum einen die Prozesse, Systeme und Strukturen der Verkehrszentrale vollständig aufgearbeitet, die dann in Kapitel 3 genutzt werden konnten, um systematisch Anwendungsfälle und Anforderungen abzuleiten. In Kapitel 4 wurden dann bestehende Forschungsbeiträge auf ihren methodischen Eignungsgrad hin untersucht, um daraus dann in Kapitel 5 ein praktisches und flexibles Entscheidungsunterstützungssystem für die Verkehrsleitung weiterzuentwickeln. Damit stellt die Arbeit den Ausgangspunkt für weitere Forschungsaktivitäten dar, um zielgerichteter die bestehenden Methoden und Algorithmen weiterentwickeln zu können.

Da neben dem Verkehrsleitsystem noch weitere IT-Systeme für verschiedene Funktionsbereiche existieren, können dort ebenfalls Entscheidungsunterstützungssysteme integriert werden. Wie dem allgemeinen Entscheidungsprozess in der Verkehrszentrale zu entnehmen ist, existieren für die einzelnen Bereiche noch ausreichend Potentiale, um auch deren Entscheidungen zu unterstützen. Mit Hilfe eines Systems für die Creweinsatz- oder die Passagierbuchungssteuerung können diese meist innerhalb ihrer Problemsituation nochmals individuell optimieren, solange es keine Auswirkungen auf die anderen Problemdimensionen mit sich zieht, oder eine alternative Lösung im Rahmen der Entscheidungsfindung vorschlagen. Mit dem in dieser Arbeit präsentierten Vorgehen können einzelne Anforderungen bei Bedarf weiter detailliert werden und Anwendungsfälle unter Umständen feiner unterteilt werden.

Auch die analysierten Modelle und Algorithmen können auf Basis der gewonnen Erkenntnisse weiterentwickelt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit den anschlussbasierten Netzwerken der aktuell am besten geeignete Ansatz gewählt, um darauf aufbauend ein System zu entwickeln. Gerade die kommerziellen Löser haben sich in den letzten zehn Jahren deutlich weiterentwickelt und sind in der Lage, auch große Probleme in Echtzeit zu lösen. Durch die Detaillierung der Anforderungen werden die mathematischen Modelle komplexer und spezielle Algorithmen sind nur noch eingeschränkt praktikabel. Trotzdem besteht hier Bedarf zur Forschung, wie und ob die für diese Arbeit nicht verwendeten Modelle und Algorithmen zur Überwindung der beschriebenen Nachteile und Nutzung ihrer Vorteile sinnvoll angepasst werden können.

Im Rahmen der Arbeit konnten einzelne Bereiche wie die Frachtsteuerung oder der Anwendungsfall eines Ground Delay Programms nicht auf dem Detaillevel wie die übrigen Aspekte untersucht werden, da die Frachtsparte des Konzerns nicht Teil der Forschungsk Kooperation war und der Konzern seinen unternehmerischen Schwerpunkt auf Flüge von und nach Europa gelegt hat. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass die enge Kooperationen mit Fluggesellschaften in diesem Forschungsbereich gleichzeitig einen Mehrwert für Forschung und Praxis erzielen kann

und daher öfter praktiziert werden sollte, um auch die offenen Aspekte noch weiter zu erforschen.

Weiterhin sind sicherlich die gesammelten Erkenntnisse und Ergebnisse nach der produktiven Einführung von Interesse. Es ist zum Teil noch ungeklärt, mit welchen Aktivitäten und Maßnahmen die verschiedenen Herausforderungen nach Einführung adressiert werden müssen. Es bestehen erste Anzeichen, dass der Einsatz eines solchen Entscheidungsunterstützungssystems die zukünftige Organisationsstruktur zum Teil auf den Prüfstand stellen wird.³²⁸

Abschließend lässt sich festhalten, dass solche Tools zur Entscheidungsunterstützung heute eigentlich schon zum täglichen Geschäft einer Vielzahl von Fluggesellschaften gehören sollten, da die eingangs beschriebenen Wachstumsprognosen die Komplexität im operativen Management weiter erhöhen werden. Geschäftsregel-Managementsysteme könnten auf Grund ihrer dargestellten Vorteile vermehrt den Einzug in die Praxis finden, um so von Planung bis Betrieb auf gemeinsame Regeln, Kriterien und Ziele innerhalb des Unternehmens zurückgreifen zu können. Es sollte daher angestrebtes Ziel bleiben, dass sich auch die Organisationsstrukturen und IT-Systeme der Verkehrszentrale weiterentwickeln, um zukünftig mehr von integrierten Systemen und einer zentralen Entscheidungsunterstützung profitieren zu können. In diesem Kontext wird oft auch das Konzept des Collaborative Decision Making (CDM) genannt, bei dem die Zusammenarbeit, Prozesse und IT-Systeme der einzelnen Systemteile Fluggesellschaften, Flughäfen und Flugsicherung des Luftverkehrs zukünftig noch mehr vernetzt und harmonisiert werden sollen.³²⁹ Allerdings ist für viele Unternehmen bereits die Anpassung der internen, historisch gewachsenen Organisation eine große Herausforderung, so dass entsprechende Ideen im unternehmensübergreifenden Kontext bisher wenig realisiert werden konnten, obwohl entsprechende Konzepte schon lange diskutiert werden.³³⁰

³²⁸ Vgl. CLARKE/LETTOVSKÝ/SMITH (2000), S. 143.

³²⁹ Vgl. BARNHART/VAZE (2016), S. 285.

³³⁰ Vgl. ROGERS/ALLEN/HOYME (2000), S. 151.

Literaturverzeichnis

- Abdelghany, A. et al. (2004a):** A proactive crew recovery decision support tool for commercial airlines during irregular operations. *Annals of Operations Research*, 127, 309–331.
- Abdelghany, K. F./Abdelghany, A. F./Ekollu, G. (2008):** An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations. *European Journal of Operational Research*, 185 Nr. 2, 825–848.
- Abdelghany, K. F. et al. (2004b):** A model for projecting flight delays during irregular operation conditions. *Journal of Air Transport Management*, 10 Nr. 6, 385–394.
- Abdi, M. R./Sharma, S. (2007):** Strategic/tactical information management of flight operations in abnormal conditions through Network Control Centre. *International Journal of Information Management*, 27 Nr. 2, 119–138.
- Abdi, M. R./Sharma, S. (2008):** Information system for flight disruption management. *International Journal of Information Management*, 28 Nr. 2, 136–144.
- Aguiar, B./Torres, J./Castro, A. J. (2011):** Operational Problems Recovery in Airlines—A Specialized Methodologies Approach. In **Antunes, L./Pinto, H. S. (Hrsg.):** *Progress in Artificial Intelligence*. 15th Portuguese Conference on Artificial Intelligence, EPIA 2011. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 83–97.
- AhmadBeygi, S. et al. (2008):** Analysis of the potential for delay propagation in passenger airline networks. *Journal of Air Transport Management*, 14 Nr. 5, 221–236.
- Air Transport Action Group (2014):** Aviation Benefits Beyond Borders. Geneva (URL: https://aviationbenefits.org/media/26780/ATAG_AviationBenefits2014_FULL_HighRes.pdf) – Zugriff am 27.10.2017.
- Air Transport Action Group (2016):** Aviation Benefits Beyond Borders. Geneva (URL: https://aviationbenefits.org/media/149668/abbb2016_full_a4_web.pdf) – Zugriff am 27.10.2017.
- Airbus (2017):** Global Market Forecast. Growing Horizons 2017/2036. Blagnac (URL: http://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/backgrounders/Airbus_Global_Market_Forecast_2017-2036_Growing_Horizons_full_book.pdf) – Zugriff am 27.10.2017.
- Alexander, D. (2013):** Volcanic ash in the atmosphere and risks for civil aviation: a study in European crisis management. *International Journal of Disaster Risk Science*, 4 Nr. 1, 9–19.
- Andersson, S.-E. (1989):** Operational planning in airline business—Can science improve efficiency? Experiences from SAS. *European Journal of Operational Research*, 43 Nr. 1, 3–12.
- Andersson, T./Värbrand, P. (2004):** The flight perturbation problem. *Transportation Planning and Technology*, 27 Nr. 2, 91–117.
- Andersson, T. (2006):** Solving the flight perturbation problem with meta heuristics. *Journal of Heuristics*, 12, 37–53.
- Argüello, M. F./Bard, J. F./Yu, G. (1997):** A GRASP for aircraft routing in response to groundings and delays. *Journal of Combinatorial Optimization*, 1 Nr. 3, 211–228.
- Argüello, M. F./Bard, J. F./Yu, G. (2002):** Models and methods for managing airline irregular operations. In **Yu, G. (Hrsg.):** *Operations research in the airline industry*. 1998. Nachdruck, Norwell: Kluwer Academic. – Kapitel 1, 1–45.
- Arıkan, U./Gürel, S./Aktürk, M. S. (2016):** Integrated aircraft and passenger recovery with cruise time controllability. *Annals of Operations Research*, 236 Nr. 2, 295–317.

-
- Avery, P. (2018):** Aircraft load planning and control. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 16, 220–238.
- Babić, O. et al. (2010):** Heuristic approach to the airline schedule disturbances problem. *Transportation Planning and Technology*, 33 Nr. 3, 257–280.
- Ball, M. et al. (2010):** Total Delay Impact Study. A Comprehensive Assessment of the Costs and Impacts of Flight Delay in the United States. Washington: The National Center of Excellence for Aviation Operations Research [URL: http://www.isr.umd.edu/NEXTOR/pubs/TDI_Report_Final_10_18_10_V3.pdf](http://www.isr.umd.edu/NEXTOR/pubs/TDI_Report_Final_10_18_10_V3.pdf) – Zugriff am 27.10.2017.
- Ball, M. et al. (2007):** Air Transportation: Irregular Operations and Control. In **Barnhart, C./Laporte, G. (Hrsg.):** Handbooks in Operations Research and Management Science. Amsterdam: North-Holland, Elsevier. – Kapitel 1, 1–67.
- Bard, J. F./Yu, G./Argüello, M. F. (2001):** Optimizing aircraft routings in response to groundings and delays. *IIE Transactions*, 33 Nr. 10, 931–947.
- Barnhart, C./Belobaba, P./Odoni, A. R. (2003):** Applications of Operations Research in the Air Transport Industry. *Transportation Science*, 4 Nr. 27, 368–391.
- Barnhart, C./Vaze, V. (2016):** Irregular Operations: Schedule Recovery and Robustness. In **Belobaba, P./Odini, A./Barnhart, C. (Hrsg.):** The Global Airline Industry. Zweite Auflage. Oxon: John Wiley & Sons. – Kapitel 10, 263–286.
- Bazargan, M. (2010):** Airline operations and scheduling. 2. Auflage. Farnham, Burlington: Ashgate.
- Berdy, P./Gershkoff, I. (2000):** Improving On-Time Performance. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 21, 309–323.
- Berthold, T. (2014):** RENS. The optimal rounding. *Mathematical Programming Computation*, 6 Nr. 1, 33–54.
- Bisaillon, S. et al. (2011):** A large neighbourhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 9 Nr. 2, 139–157.
- Boeing (2017):** Current Market Outlook 2017-2036. Seattle [URL: http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/market/current-market-outlook-2017/assets/downloads/2017-cmo-6-19.pdf](http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/market/current-market-outlook-2017/assets/downloads/2017-cmo-6-19.pdf) – Zugriff am 27.10.2017.
- Bouarfa, S./Blom, H. A./Curran, R. (2016):** Agent-based modeling and simulation of coordination by airline operations control. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 4 Nr. 1, 9–20.
- Boyer, M. (2009):** IOCC - Integrated Operations Control Centre. Montreal: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Bratu, S./Barnhart, C. (2006):** Flight operations recovery: New approaches considering passenger recovery. *Journal of Scheduling*, 9 Nr. 3, 279–298.
- Bruce, P. J. (2011):** Understanding Decision-making Processes in Airline Operations Control. Farnham, Burlington: Ashgate.
- Bruce, P. J. (2018):** Operational disruptions. Causes, strategies, and consequences. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 22, 323–339.
- Brunner, J. O. (2014):** Rescheduling of flights during ground delay programs with consideration of passenger and crew connections. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, 236–252.

-
- Buchanan, S. (2018):** Operational planning and control. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 8, 116–124.
- Cao, J.-M./Kanafani, A. (1997a):** Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays part I: mathematical formulation. *Transportation Planning and Technology*, 20 Nr. 3, 183–199.
- Cao, J.-M./Kanafani, A. (1997b):** Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays Part II: algorithm and computational experiments. *Transportation Planning and Technology*, 20 Nr. 3, 201–217.
- Caserta, M./Voß, S. (2009):** Methaheuristics: Intelligent Problem Solving. In **Maniezzo, V./Stützle, T./Voß, S. (Hrsg.):** Matheuristics. Hybridizing Metaheuristics and Mathematical Programming. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer. – Kapitel 1, 1–38.
- Castro, A. J. M./Oliveira, E. (2007):** Using specialized agents in a distributed MAS to solve airline operations problems: a case study. In **Lin, T. Y. et al. (Hrsg.):** 2007 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 473–476.
- Castro, A. J./Oliveira, E. (2011):** A new concept for disruption management in airline operations control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 225 Nr. 3, 269–290.
- Castro, A. J./Rocha, A. P./Oliveira, E. (2014):** A New Approach for Disruption Management in Airline Operations Control. Hoboken: Springer.
- Chang, S.-C. (2012):** A duty based approach in solving the aircrew recovery problem. *Journal of Air Transport Management*, 19, 16–20.
- Chatrain, B. (2011):** The Triple Crown of Schedule Recovery. London: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Chen, C.-H./Chou, J.-H. (2017):** Multiobjective Optimization of Airline Crew Roster Recovery Problems Under Disruption Conditions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47 Nr. 1, 133–144.
- Chen, D.-S./Batson, R. G./Dang, Y. (2010):** Applied integer programming: modeling and solution. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Chen, X./Chen, X./Zhang, X. (2010):** Crew scheduling models in airline disruption management. In *IEEE 17th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.*, 1032–1037.
- Clarke, M. D. D. (1998a):** Development of heuristic procedures for flight rescheduling in the aftermath of irregular airline operations. Dissertation Massachusetts Institute of Technology, Boston, <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/10109/39760797-MIT.pdf?sequence=2> – Zugriff am 06.01.2018.
- Clarke, M. D. D. (1998b):** Irregular airline operations: a review of the state-of-the-practice in airline operations control centers. *Journal of Air Transport Management*, 4 Nr. 2, 67–76.
- Clarke, M. D. D./Lettovský, L./Smith, B. C. (2000):** The Development of the Airline Operations Control Center. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 10, 131–147.
- Clausen, J. et al. (2010):** Disruption management in the airline industry - Concepts, models and methods. *Computers & Operations Research*, 37 Nr. 5, 809–821.
- Cook, A./Tanner, G. (2011):** European airline delay cost reference values. London: Department of Transport Studies, University of Westminster <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/european->

- airline-delay-cost-reference-values-final-report-v3.2.pdf) – Zugriff am 02.01.2018.
- Cook, G. N./Billig, B. G. (2017):** Airline Operations and Management. Oxon, New York: Routledge.
- Cuningham, C. (2016):** Operational Recovery. Seattle: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- DeArmon, J. S./Goodfriend, J./MacReynolds, W. (2000):** Styles of FLight Cancelation: Airlines' Varying Reactions to Disruptions. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 15, 223–235.
- Deutscher Wetterdienst (2018):** METAR/TAF. Wetterschlüssel für die Luftfahrt. Offenbach (URL: https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/luftfahrt/metar_taf.pdf?__blob=publicationFile&v=2) – Zugriff am 02.01.2018.
- Domschke, W. et al. (2015):** Einführung in Operations Research. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- Donnison, N. (2018):** Air cargo processes. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 15, 208–219.
- Eggenberg, N./Salani, M./Bierlaire, M. (2007):** A column generation algorithm for disrupted airline schedules. Transport and Mobility Laboratory, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (TRANSP-OR 071203). – Technischer Bericht (URL: <http://infoscience.epfl.ch/record/117328>) – Zugriff am 06.01.2018.
- Eggenberg, N./Salani, M./Bierlaire, M. (2010):** Constraint-specific recovery network for solving airline recovery problems. Computers & operations research, 37 Nr. 6, 1014–1026.
- Ekollu, G./Narasimhan, R. (2005):** „Intuitive Optimization “. Moving beyond theoretical solutions for Day-of-Operations problems. Mainz: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Feng, B./Li, Y./Shen, Z.-J. M. (2015):** Air cargo operations: Literature review and comparison with practices. Transportation Research Part C, 56, 263–280.
- Fennell, P. (2018):** Crew planning. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 9, 125–139.
- Filar, J. A./Manyem, P./White, K. (2001):** How Airlines and Airports Recover from Schedule Perturbations: A Survey. Annals of Operations Research, 108, 315–333.
- Fluck, M./Brand, S./Dorndorf, U. (2013):** NetStar Aircraft Recovery Optimization. Frankfurt: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Franzi, M. (2018):** Ramp operations. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 13, 181–194.
- Gao, C. (2007):** Airline Integrated Planning and Operations. Dissertation Georgia Institute of Technology, Atlanta, (URL: https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/16292/gao_chunhua_200708_phd.pdf?sequence=1&isAllowed=y) – Zugriff am 09.02.2018.
- Gao, Q./Tang, X.-w./Zhu, J.-f. (2009):** Research on greedy simulated annealing algorithm for irregular flight schedule recovery model. In IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services., 1469–1475.
- Grandeau, S. C./Clarke, M. D./Mathaisel, D. F. X. (2002):** The process of airline system operations control. In **Yu, G. (Hrsg.):** Operations research in the airline industry. 1998. Nachdruck, Norwell: Kluwer Academic. – Kapitel 11, 147–157.

-
- Grönkvist, M. (2005):** The Tail Assignment Problem. Dissertation Chalmers & Göteborg University, Göteborg, ww1.jepesen.com/documents/aviation/commercial/crtr0502_final.pdf – Zugriff am 09.03.2018.
- Grothklags, S. (2009):** Interactive Optimization for Schedule Recovery. Montreal: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Grundy, M./Moxon, R. (2013):** The effectiveness of airline crisis management on brand protection: A case study of British Airways. *Journal of Air Transport Management*, 28, 55–61.
- Götz, G. von (2005):** Komplexe Betriebsprozesse klassischer Passage Airlines oder: „Wie funktioniert eigentlich das Hirn einer Fluggesellschaft?“. In **Voigt, B./Linke, M. (Hrsg.):** Der Erfolg eines Systemhauses. Zehn Jahre Lufthansa Systems. Heidelberg: Physica, 147–157.
- Guo, Y. (2005):** Decision Support Systems for Airline Crew Recovery. Dissertation Universität Paderborn, <https://d-nb.info/976568284/34> – Zugriff am 06.01.2018.
- Guo, Y./Suhl, L./Thiel, M. P. (2005):** Solving the airline crew recovery problem by a genetic algorithm with local improvement. *Operational Research*, 5 Nr. 2, 241–259.
- Horswell, J. (2018):** Operating a flight. A flight attendant’s perspective. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 20, 287–310.
- Horton, S. K./Murthy, A. (2000):** Operations Control and Contingency Planning. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 16, 237–247.
- Hu, Y. et al. (2017):** Multiple objective solution approaches for aircraft rerouting under the disruption of multi-aircraft. *Expert Systems with Applications*, 83, 283–299.
- Hu, Y. et al. (2016):** Integrated recovery of aircraft and passengers after airline operation disruption based on a GRASP algorithm. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 87, 97–112.
- Hu, Y. et al. (2015):** Optimization of multi-fleet aircraft routing considering passenger transiting under airline disruption. *Computers & Industrial Engineering*, 80, 132–144.
- IATA (2011):** Standard Schedules Information Manual. Montreal, March 2011.
- Irrgang, M. E. (2000):** Airline Operational Efficiency. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 12, 169–192.
- Jafari, N./Zegordi, S. H. (2010):** The airline perturbation problem: considering disrupted passengers. *Transportation Planning and Technology*, 33 Nr. 2, 203–220.
- Jafari, N./Zegordi, S. H. (2011):** Simultaneous recovery model for aircraft and passengers. *Journal of the Franklin Institute*, 348 Nr. 7, 1638–1655.
- Jarrah, A. I. Z. et al. (1993):** A decision support framework for airline flight cancellations and delays. *Transportation Science*, 27 Nr. 3, 266–280.
- Jofré, M./Irrgang, M. E. (2000):** Integration of Cargo and Passenger Operations. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 18, 259–271.
- Kallrath, J. (2013):** Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- Karisch, S. E. et al. (2012):** Operations. In **Barnhart, C./Smith, B. (Hrsg.):** Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry. A Modeling Methodology Handbook. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer. – Kapitel 6, 283–383.
- Karlberg, D. (2013):** Optimizing aircraft assignment to save fuel and improve operational stability. Frankfurt: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.

-
- Kim, G. (2018):** Dispatch and flight following. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 17, 239–253.
- Kleiner, M. M./Pilarski, A. (2000):** Labor and Operations. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 42, 621–633.
- Kohl, N. et al. (2007):** Airline disruption management—perspectives, experiences and outlook. *Journal of Air Transport Management*, 13 Nr. 3, 149–162.
- Kondo, A. (2011):** Impacts of delay propagation on airline operations: Network vs. point-to-point carriers. In *Integrated Communications, Navigation, and Surveillance Conference Proceedings.*, L4–1–L4–7.
- Lapp, M./Wikenhauser, F. (2012):** Incorporating aircraft efficiency measures into the tail assignment problem. *Journal of Air Transport Management*, 19, 25–30.
- Lauber, J. K. (2000):** Extended Range Twin-Engine Operations - An Overview. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 3, 25–35.
- Le, M.-l./Wu, C.-c. (2013):** Solving airlines disruption by considering aircraft and crew recovery simultaneously. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 18 Nr. 2, 243–252.
- Le, M./Sun, L. (2011):** Optimal airline crew recovery considering flight time constraint and paring rule. In *International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering.*, 118–121.
- Lei, Q. et al. (2013):** Research on the disrupted airline scheduling. In **Cai, X. et al. (Hrsg.):** 10th International Conference on Service Systems and Service Management. *Proceedings of ICSSSM'13.* Piscataway: IEEE, 332–336.
- Lettofsky, L. (1997):** Airline Operations Recovery. Dissertation Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Lettofsky, L. et al. (1999):** Real-Time Recovery. Aircraft, Crew & Passengers. Istanbul: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Lettofsky, L./Johnson, E. L./Nemhauser, G. L. (2000):** Airline crew recovery. *Transportation Science*, 34 Nr. 4, 337–348.
- Li, F. et al. (2010):** Rule-based optimization approach for airline load planning system. *Procedia Computer Science*, 1 Nr. 1, 1455–1463.
- Liu, T.-K./Chen, C.-H./Chou, J.-H. (2010):** Optimization of short-haul aircraft schedule recovery problems using a hybrid multiobjective genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 37 Nr. 3, 2307–2315.
- Liu, T.-K./Jeng, C.-R./Chang, Y.-H. (2008):** Disruption management of an inequality-based multi-fleet airline schedule by a multi-objective genetic algorithm. *Transportation Planning and Technology*, 31 Nr. 6, 613–639.
- Liu, T.-K. et al. (2006):** Applications of multi-objective evolutionary algorithm to airline disruption management. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.* Band 5, Taipei, 4130–4135.
- Løve, M. et al. (2002):** Disruption management for an airline—rescheduling of aircraft. In **Cagnoni, S. et al. (Hrsg.):** Applications of Evolutionary Computing. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 315–324.
- Løve, M. et al. (2005):** Using Heuristics to Solve the Dedicated Aircraft Recovery Problem. *Central European Journal of Operations Research*, 13 Nr. 2, 189–207.
- Luo, S./Yu, G. (1997):** On the airline schedule perturbation problem caused by the ground delay program. *Transportation Science*, 31 Nr. 4, 298–311.

-
- Luo, S./Yu, G. (2002):** Airline schedule perturbation problem: landing and takeoff with nonsplittable resource for the ground delay program. In **Yu, G. (Hrsg.):** Operations research in the airline industry. 1998. Nachdruck, Norwell: Kluwer Academic. – Kapitel 14, 404–432.
- Maher, S. J. (2015a):** A novel passenger recovery approach for the integrated airline recovery problem. *Computers & Operations Research*, 57, 123–137.
- Maher, S. J. (2015b):** Solving the integrated airline recovery problem using column-and-row generation. *Transportation Science*, 50 Nr. 1, 216–239.
- Marla, L./Vaaben, B./Barnhart, C. (2017):** Integrated disruption management and flight planning to trade off delays and fuel burn. *Transportation Science*, 51 Nr. 1, 88–111.
- Martinez, B./Ergan, H. (2013):** Recovery Planning during Major Disruption Events. Frankfurt: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Mathaisel, D. F. X. (1996):** Decision support for airline system operations control and irregular operations. *Computers & Operations Research*, 23 Nr. 11, 1083–1098.
- Maurer, P. (2006):** Luftverkehrsmanagement. 4. Auflage. München: Oldenburg.
- Medard, C. P./Sawhney, N. (2007):** Airline crew scheduling from planning to operations. *European Journal of Operational Research*, 183 Nr. 3, 1013–1027.
- Mensen, H. (2013):** Planung, Anlage und Betrieb von Flugplätzen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Movig, R. (2018):** Baggage processes. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 14, 195–207.
- Nemhauser, G. L./Wolsey, L. A. (1999):** Integer programming and combinatorial optimization. 1988. Nachdruck, Hoboken: Wiley Interscience.
- Nichols, W./Sala, S. (2000):** Minimizing Connecting Times: A Must for Airline Competitiveness. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 27, 403–418.
- Nickkar, A. et al. (2015):** Developing a model for solving the flight perturbation problem. *Journal of Airline and Airport Management*, 5 Nr. 1, 18–38.
- Nissen, R./Haase, K. (2006):** Duty-period-based network model for crew rescheduling in European airlines. *Journal of Scheduling*, 9 Nr. 3, 255–278.
- Niznik, T. (2017):** Probabilistic Decision Making and the IOC: Why it pays to play games of chance. Athen: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Nomura, K. (2003):** Managing risks in the airline industry. *Japan and the World Economy*, 15 Nr. 4, 469–479.
- Pachon, J. (2011):** Creating the World's Largest Operations. London: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Pazourek, M./Václavík, V. (2017):** Assessment of Business Aviation OCCs' Capacity Issues. *Procedia Engineering*, 187, 46–52.
- Pejovic, T. et al. (2009):** A tentative analysis of the impacts of an airport closure. *Journal of Air Transport Management*, 15 Nr. 5, 241–248.
- Petersen, J. et al. (2010):** An Optimization Based Approach to Airline Integrated Recovery. Brisbane: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Petersen, J. et al. (2011):** Lessons Learned from Integrated Recovery. London: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Petersen, J. D. et al. (2012):** An Optimization Approach to Airline Integrated Recovery. *Transportation Science*, 46 Nr. 4, 482–500.

-
- Power, D. J./Sharda, R. (2007):** Model-driven decision support systems: Concepts and research directions. *Decision Support Systems*, 43 Nr. 3, 1044–1061.
- PricewaterhouseCoopers (2016):** Economic Impact of Air Traffic Control Strikes in Europe. London (URL: <http://www.politico.eu/wp-content/uploads/2016/10/ATCimpactreportA4E.pdf>) – Zugriff am 27.01.2018.
- Pujet, N./Feron, E./Rakhit, A. (1998):** Modeling of an airline operations control center as a queueing network. In *Proceedings of the 1998 American Control Conference.*, 1800–1803.
- Rafiei, F./Manzari, S./Khashei, M. (2012):** Scheduling Flight Perturbations with Ant Colony Optimization Approach. *International Journal of Computer Science and Artificial Intelligence*, 2 Nr. 2, 1–9.
- Rakshit, A./Krishnamurthy, N./Yu, G. (1996):** System operations advisor: a real-time decision support system for managing airline operations at united airlines. *Interfaces*, 26 Nr. 2, 50–58.
- Rapajic, J. (2009):** Beyond airline disruptions. Farnham, Burlington: Ashgate.
- Richter, H. (1989):** Thirty years of airline operations research. *Interfaces*, 19 Nr. 4, 3–9.
- Riege, C./Saat, J./Bucher, T. (2009):** Systematisierung von Evaluationsmethoden in der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatik. In **Becker, J./Krcmar, H./Niehaves, B. (Hrsg.):** Wissenschaftstheorie und gestaltungsorientierte Wirtschaftsinformatik. Heidelberg: Physica-Verlag, 69–86.
- Roberts, A. (2018):** Airside resource planning. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** Airline operations. A practical guide. Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 11, 152–161.
- Rogers, W. H./Allen, J. A./Hoyme, K. P. (2000):** The Airline Operations Center Dilemma: Solving „Day-of-Operation“ Disruption with Greater Economic Efficiency. In **Buttler, G. F./Keller, M. R. (Hrsg.):** Handbook of Airline Operations. New York: Aviation Week. – Kapitel 11, 149–168.
- Rosenberger, J. M./Johnson, E. L./Nemhauser, G. L. (2003):** Rerouting aircraft for airline recovery. *Transportation Science*, 37 Nr. 4, 408–421.
- Rosenberger, J. M./Johnson, E. L./Nemhauser, G. L. (2004):** A robust fleet-assignment model with hub isolation and short cycles. *Transportation science*, 38 Nr. 3, 357–368.
- Rosenberger, J. M. et al. (2002):** A stochastic model of airline operations. *Transportation science*, 36 Nr. 4, 357–377.
- Santos, G./Robin, M. (2010):** Determinants of delays at European airports. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44 Nr. 3, 392–403.
- Schrijver, A. (2000):** Theory of linear and integer programming. 1987. Nachdruck, Chichester: John Wiley & Sons.
- Schumer, C. E./Maloney, C. B. (2008):** Your Flight has been delayed again. Flight Delays cost Passangers, Airlines and the U.S. Economy Billions. Washington: Joint Economic Committee (URL: https://www.jec.senate.gov/public/index.cfm/democrats/2008/5/your-flight-has-been-delayed-again_1539) – Zugriff am 27.10.2017.
- Sinclair, K./Cordeau, J.-F./Laporte, G. (2014):** Improvements to a large neighborhood search heuristic for an integrated aircraft and passenger recovery problem. *European Journal of Operational Research*, 233 Nr. 1, 234–245.
- Sinclair, K./Cordeau, J.-F./Laporte, G. (2016):** A column generation post-optimization heuristic for the integrated aircraft and passenger recovery problem. *Computers & Operations Research*, 65, 42–52.
- Smith, B. C./Johnson, E. L. (2006):** Robust Airline Fleet Assignment: Imposing Station Purity Using Station Decomposition. *Transportation Science*, 40 Nr. 4, 479–516.

-
- Song, M./Wei, G./Yu, G. (2002):** A decision support framework for crew management during airline irregular operations. In **Yu, G. (Hrsg.):** Operations Research in the airline industry. 1998. Nachdruck, Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic. – Kapitel 9, 259–286.
- Stecher, D. R. (2016):** Airline Operations Management by Exception - The Social Connected Traveler. Seattle: Vortrag, AGIFORS Airline Operations Study Group Meeting.
- Steglich, M./Feige, D./Klaus, P. (2016):** Logistik-Entscheidungen. Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in der Logistik mit LogisticsLab. 2. Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter.
- Stegmüller, M. (2015):** Einschränkungen des Streikrechts in Betrieben der Daseinsvorsorge Varianten einer denkbaren gesetzlichen Normierung. Neue Zeitschrift für Arbeitsrecht (NZA), 32 Nr. 12, 723–728.
- Stegner, C. (2014):** Leistungs- und Qualitätsmessung für einen passagier-orientierten Umgang mit Betriebsstörungen im Luftverkehr. Dissertation Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, [URL: https://opus4.kobv.de/opus4-btu/files/3537/stegner_christian.pdf](https://opus4.kobv.de/opus4-btu/files/3537/stegner_christian.pdf) – Zugriff am 27.02.2018.
- Stojković, G. et al. (2002):** An optimization model for a real-time flight scheduling problem. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 36 Nr. 9, 779–788.
- Stojković, M./Soumis, F. (2001):** An optimization model for the simultaneous operational flight and pilot scheduling problem. Management Science, 47 Nr. 9, 1290–1305.
- Stojković, M./Soumis, F. (2005):** The operational flight and multi-crew scheduling problem. Yugoslav Journal of Operations Research, 15 Nr. 1, 25–48.
- Stojković, M./Soumis, F./Desrosiers, J. (1998):** The operational airline crew scheduling problem. Transportation Science, 32 Nr. 3, 232–245.
- Talluri, K. T. (1996):** Swapping applications in a daily airline fleet assignment. Transportation Science, 30 Nr. 3, 237–248.
- Teodorović, D./Guberinić, S. (1984):** Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation. European Journal of Operational Research, 15 Nr. 2, 178–182.
- Teodorović, D./Stojković, G. (1990):** Model for operational daily airline scheduling. Transportation Planning and Technology, 14 Nr. 4, 273–285.
- Teodorović, D./Stojković, G. (1995):** Model to reduce airline schedule disturbances. Journal of Transportation Engineering, 121 Nr. 4, 324–331.
- Thengvall, B. G./Bard, J. F./Yu, G. (2000):** Balancing user preferences for aircraft schedule recovery during irregular operations. IIE Transactions, 32 Nr. 3, 181–193.
- Thengvall, B. G./Bard, J. F./Yu, G. (2003):** A bundle algorithm approach for the aircraft schedule recovery problem during hub closures. Transportation Science, 37 Nr. 4, 392–407.
- Thengvall, B. G./Yu, G./Bard, J. F. (2001):** Multiple fleet aircraft schedule recovery following hub closures. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 35 Nr. 4, 289–308.
- Visentini, M. S. et al. (2014):** Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services. Journal of Scheduling, 17 Nr. 6, 541–567.
- Voltes-Dorta, A./Rodríguez-Déniz, H./Suau-Sanchez, P. (2017):** Passenger recovery after an airport closure at tourist destinations: A case study of Palma de Mallorca airport. Tourism Management, 59, 449–466.
- Vos, H.-W. M./Santos, B. F./Omondi, T. (2015):** Aircraft schedule recovery problem – a dynamic modeling framework for daily operations. Transportation Research Procedia, 10, 931–940.
- Wei, G./Yu, G./Song, M. (1997):** Optimization model and algorithm for crew management during airline irregular operations. Journal of Combinatorial Optimization, 1 Nr. 3, 305–321.

-
- Wieske-Hartz, H. C. (2000):** Airline Operation. Praxishandbuch für Boden- und Flugpersonal im Flugbetrieb. 2. Auflage. Allershausen: NARA-Verlag.
- Wissenschaftlicher Beirat beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016):** Streiks und die Zuverlässigkeit der Verkehrsbedienung. Wissenschaftsdienst, 96 Nr. 2, 114–121.
- Wolsey, L. A. (1998):** Integer programming. New York: Wiley-Interscience.
- Wu, C./Le, M. (2012):** A new approach to solve aircraft recovery problem. In The Second International Conference on Advanced Communications and Computation., 148–154.
- Wu, C.-L. (2005):** Inherent delays and operational reliability of airline schedules. Journal of Air Transport Management, 11 Nr. 4, 273–282.
- Wu, C.-L. (2010):** Airlines Operations and Delay Management. Farnham, Burlington: Ashgate.
- Wu, Z. et al. (2017):** Solving Long Haul Airline Disruption Problem Caused by Groundings Using A Distributed Fixed-Point Computational Approach to Integer Programming. Neurocomputing, 269, 232–255.
- Xiong, J./Hansen, M. (2013):** Modelling airline flight cancellation decisions. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 56, 64–80.
- Yan, S./Lin, C.-G. (1997):** Airline scheduling for the temporary closure of airports. Transportation Science, 31 Nr. 1, 72–82.
- Yan, S./Tu, Y.-P. (1997):** Multifleet routing and multistop flight scheduling for schedule perturbation. European Journal of Operational Research, 103 Nr. 1, 155–169.
- Yan, S./Yang, D.-H. (1996):** A decision support framework for handling schedule perturbation. Transportation Research Part B: Methodological, 30 Nr. 6, 405–419.
- Yan, S./Young, H.-F. (1996):** A decision support framework for multi-fleet routing and multi-stop flight scheduling. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 30 Nr. 5, 379–398.
- Yang, M. (2007):** Using Advanced Tabu Search Techniques to Solve Airline Disruption Management Problems. Dissertation University of Texas, Austin, (URL: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/3660/yangm23467.pdf>) – Zugriff am 09.02.2018.
- Yu, G. et al. (2003):** A new era for crew recovery at continental airlines. Interfaces, 33 Nr. 1, 5–22.
- Yu, G./Qi, X. (2004):** Disruption Management. Framework, Models and Applications. Singapore: World Scientific.
- Zegordi, S. H./Jafari, N. (2010):** Solving the Airline Recovery Problem By Using Ant Colony Optimization. International Journal of Industrial Engineering & Production Research, 21 Nr. 3, 121–128.
- Zhang, D./Lau, H. Y. (2014):** A Rolling Horizon Based Algorithm for Solving Integrated Airline Schedule Recovery Problem. Journal of Automation and Control Engineering, 2 Nr. 4, 332–337.
- Zhang, D./Lau, H. H./Yu, C. (2015):** A two stage heuristic algorithm for the integrated aircraft and crew schedule recovery problems. Computers & Industrial Engineering, 87, 436–453.
- Zhang, D. et al. (2016):** A math-heuristic algorithm for the integrated air service recovery. Transportation Research Part B: Methodological, 84, 211–236.
- Zhang, J./Zhang, X. (2010):** Inter-Fleet and Intra-Fleet Models of Pilot and Flight Attendant for the Crew Recovery Problem. In International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment., 1–6.

-
- Zhang, Y./Hansen, M. (2008):** Real-time intermodal substitution: Strategy for airline recovery from schedule perturbation and for mitigation of airport congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Nr. 2052, 90–99.
- Zhao, X./Guo, Y. (2012):** Study on GRAPS-ACO algorithm for irregular flight rescheduling. In *International Conference on Computer Science & Service System.*, 266–269.
- Zhao, X./Zhu, J. (2007):** Grey programming for irregular flight scheduling. In *IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services.*, 1607–1611.
- Zhao, X./Zhu, J./Mei, G. (2007):** Application of grey programming in irregular flights scheduling. In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.*, 164–168.
- Zimmermann, F. (2018):** Operating a flight. A passengers’s perspective. In **Bruce, P. J./Gao, Y./King, J. M. C. (Hrsg.):** *Airline operations. A practical guide.* Oxon, New York: Routledge. – Kapitel 21, 311–319.